

Université Mohamed Khider – Biskra

Faculté des Sciences & Technologie

Département d'Architecture

Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الهندسة المعمارية

المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de :

Doctorat en Architecture

Spécialité : Architecture, Environnement dans les Zones Arides

Impact du ratio d'ouverture des murs de façade sur la performance lumineuse, thermique et énergétique d'un bâtiment. Cas des régions chaudes et arides

Présentée par :

LAKHDARI Khaoula

Soutenue publiquement le : 30/11/2021

Devant le jury composé de :

Dr. BELGHAR Nouredine	Professeur	Président	Université de Biskra
Dr. SRITI Leila	Professeur	Directrice de thèse	Université de Biskra
Dr. BERKOUK Djihed	MCA	Examineur	Université de Biskra
Dr. HAMOUDA Abida	MCA	Examineur	Université de Batna
Dr. GUEDDOUH Merouane Samir	MCA	Examineur	Université de Batna
Dr. PAINTER Birgit	PhD	Invitée	De Montfort University, UK

Dédicace

*Je dédie ce travail de recherche à mon père et ma mère
Que Dieu leur accorde une bonne santé et une longue vie.
A mes Frères et Sœurs, et tous ceux qui me sont chers.*

Remerciements

Tout d'abord, je tiens à remercier Dieu, le Tout-Puissant, de m'avoir donné la force, le courage et la patience, pour terminer ce travail.

Je voudrais exprimer ma profonde gratitude à Dr. SRITI Leila ma directrice de thèse, pour m'avoir guidée, conseillée et encouragée tout au long de mon parcours. Ainsi que Dr. PAINTER Birgit pour son aide et ses orientations qui ont enrichies ma recherche, je lui exprime mes vifs remerciements.

Mes remerciements vont également vers les membres du jury Dr. BELGHAR Noureddine, Dr. BERKOUK Djihed, Dr. HAMOUDA Abida, Dr. GUEDDOUH Merouane Samir pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma thèse et pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Je tiens également à exprimer mes remerciements à tous ceux qui m'ont aidée et soutenue de près ou de loin pour mener ce travail de recherche à bout.

Résumé

Dans les bâtiments scolaires, en particulier les salles de classe, il est impératif d'assurer un confort à la fois lumineux et thermique pour promouvoir le processus éducatif. En effet, si les conditions de confort sont insatisfaisantes, cela peut réduire considérablement les performances physiques et intellectuelles des enseignants et des apprenants. La fenêtre est un élément de l'enveloppe qui joue un rôle majeur dans le transfert de chaleur entre l'extérieur et l'intérieur ; le ratio d'ouverture des fenêtres de la façade, en particulier, a un impact significatif sur la consommation énergétique du bâtiment et la qualité des ambiances intérieures. Le maintien d'un environnement intérieur confortable et sain avec un minimum de consommation d'énergie est un défi pour les architectes surtout dans les régions où prédomine un climat chaud et sec. Dans ces régions en effet, concevoir des bâtiments naturellement éclairés, thermiquement confortables tout en consommant le moins d'énergie possible relève presque du paradoxe. Or, la conception de la façade et surtout le choix approprié de la surface transparente semble être décisif pour relever un tel défi. Le problème est encore plus complexe dans les bâtiments scolaires où il est impératif d'assurer le juste équilibre entre la lumière naturelle, le confort thermique et la consommation d'énergie, ce qui est particulièrement difficile pour les climats chauds et secs. Résoudre ce problème nécessite le développement d'une approche multicritère qui intègre les données climatiques, formelles et fonctionnelles. L'objectif principal de cette étude est d'initier une telle approche qui mette en exergue l'impact du ratio d'ouverture des fenêtres de la façade sur la performance lumineuse, thermique, et énergétique dans les salles de classe, en prenant comme cas d'étude la ville de Biskra.

La méthode proposée repose sur trois approches: conceptuelle, empirique et numérique/paramétrique. L'approche conceptuelle a permis de construire les connaissances théoriques sur le sujet, et de positionner l'étude par rapport à la littérature existante. Pour sa part, l'approche empirique a été basée sur une étude in situ dans laquelle des mesures de niveaux d'éclairage et des températures intérieures ont été effectuées pendant la période la plus froide et la période la plus chaude de l'année scolaire. Le but était d'évaluer les performances lumineuses et les conditions de confort thermiques réalisées dans les salles de classe avec des ratios d'ouvertures différents. Enfin, l'approche numérique basée sur la simulation par le logiciel évolutionnaire Rhino/Grasshopper a permis d'entreprendre une étude paramétrique visant à optimiser les paramètres de conception des fenêtres des salles de classe relativement aux conditions climatiques chaudes et arides. Le processus a commencé d'abord par la

validation du modèle numérique. Ensuite, les premiers tests de simulation consistaient à analyser l'impact combiné du ratio d'ouverture des fenêtres de la salle de classe considérant quatre paramètres clés susceptibles de l'affecter à savoir : orientation, type de vitrage, dispositif d'ombrage, composant des parois. L'évaluation de la performance du modèle s'est faite en termes de niveau d'éclairage, conditions de confort thermique, et consommation énergétique annuelle. Finalement, une méthode d'optimisation a été appliquée à l'aide d'une approche paramétrique et d'un calcul multi-objectifs évolutif via le plug-in Octopus pour Grasshopper. En variant l'orientation de la salle de classe, divers rapports fenêtres/mur, types de verre et dispositifs d'ombrage ont été combinés, pour dériver des solutions potentielles qui permettraient d'obtenir un bon équilibre entre la lumière du jour et le confort thermique, tout en assurant une faible consommation d'énergie.

Les résultats donnent un aperçu de l'interaction entre les différents paramètres de l'enveloppe du bâtiment dans les climats chauds et secs, ainsi que des indications pour explorer différentes combinaisons et choix possibles en vue d'optimiser la conception de la façade et choisir les caractéristiques de la surface transparente les plus appropriées pour le contexte climatique considéré. Lorsqu'ils sont intégrés à une simulation plus détaillée ou à d'autres objectifs de performance qui font généralement partie des bonnes pratiques de conception, ces paramètres peuvent être un outil utile pour réussir une conception climatique et améliorer les performances du bâtiment. Dans le cadre de la présente recherche, des solutions potentielles pour différentes orientations ont été explorées, fournissant des recommandations pour les ratios fenêtre/mur dans les bâtiments scolaires dans un climat chaud et sec. Les résultats montrent, également, comment une méthodologie d'optimisation peut être utilisée dans les premières étapes du processus de conception du bâtiment pour déterminer les paramètres architecturaux propres à l'enveloppe pouvant assurer la performance environnementale du bâtiment, à la fois en termes de confort et d'efficacité énergétique.

Mots clés

Bâtiment scolaire, Confort thermique, Performance lumineuse, Consommation énergétique, Ratio d'ouverture des fenêtres de la façade (WWR), Climat chaud et sec.

Abstract

In school buildings, especially classrooms, it is imperative to ensure both daylight and thermal comfort to promote the educational process. Indeed, if the comfort conditions are unsatisfactory, this can considerably reduce the physical and intellectual performance of teachers and learners. The window is an element of the envelope which plays a major role in the transfer of heat between the exterior and the interior; the window-to-wall ratio (WWR), in particular, has a significant impact on the building's energy consumption and the quality of interior environments. Maintaining a comfortable and healthy indoor environment with minimum energy consumption is a challenge for architects, especially in areas where a hot and dry climate prevails. In these regions, designing naturally lit, thermally comfortable buildings while consuming as little energy as possible is almost a paradox. However, the design of the facade and especially the appropriate choice of the transparent surface seems to be decisive in meeting such a challenge. The problem is even more complex in school buildings where it is imperative to insure the right balance between natural light, thermal comfort and energy consumption, which is particularly difficult in hot and dry climates. Solving this problem requires the development of a multicriteria approach that integrates climatic, formal and functional data. The main objective of this study is to initiate such an approach which highlights the impact of the window-to-wall ratio on the luminous, thermal and energy performance in classrooms, taking as a case study the city of Biskra.

The proposed method is based on three approaches: conceptual, empirical and numerical/parametric. The conceptual approach was built the theoretical knowledge on the subject and positioned the study in regards to the existing literature. For its part, the empirical approach was based on an in situ study in which measurements of daylighting levels and indoor temperatures were made during the coldest and hottest periods of the school year. The aim was to assess the lighting performance and thermal comfort conditions achieved in classrooms with different opening ratios. Finally, the simulation-based numerical approach by the evolutionary software Rhino/Grasshopper enabled a parametric study to be undertaken to optimize the design parameters of classroom windows in relation to hot and arid climatic conditions. The process began with the validation of the digital model. Then, the first simulation tests consisted of analyzing the combined impact of the classroom window opening ratio considering four key parameters likely to affect it, namely: orientation, type of glazing, shading device, component walls. The performance of the model was evaluated in terms of lighting level, thermal comfort conditions, and annual energy consumption. Finally, an optimization method was applied using

a parametric approach and evolutionary multi-objective computation via the Octopus plug-in for Grasshopper. By various classrooms' orientation, window-to-wall ratios, glass types and shading devices were combined, to derive potential solutions that would achieve a good balance between daylight provision and thermal comfort, while ensuring low energy consumption.

The results provide insight into the interaction between different parameters of the building envelope in hot and dry climates, as well as indications for exploring different possible combinations and choices in order to optimize the facade design and choose the most appropriate characteristics of the transparent surface for the considered climatic context. When incorporated into a more detailed simulation or other performance goals that are generally part of good design practice, these parameters can be a useful tool for successful climate design and improving building performance. As part of the present research, potential solutions for different orientations were explored, providing recommendations for window-to-wall ratios in school buildings in a hot and dry climate. The results also show how an optimization methodology can be used in the early stages of the building design process to determine the architectural parameters specific to the envelope that can ensure the environmental performance of the building, both in terms of comfort and energy efficiency.

Key words

School building, Thermal comfort, daylight performance, Energy consumption, window-to-wall ratio (WWR), Hot and dry climate.

ملخص

في المباني المدرسية وخاصة الفصول الدراسية، من الضروري ضمان الراحة الضوئية والحرارية لتعزيز العملية التعليمية. في الواقع، إذا كانت ظروف الراحة غير مرضية، فقد يؤدي ذلك إلى تقليل الأداء البدني والفكري للمدرسين والمتعلمين بشكل كبير. النافذة هي عنصر من عناصر غلاف المبنى الذي يلعب دورًا رئيسيًا في انتقال الحرارة بين الخارج والداخل؛ نسبة مساحة النوافذ لجران الواجهة، على وجه الخصوص، لها تأثير كبير على استهلاك الطاقة في المبنى وجودة البيئة الداخلية. يعد الحفاظ على بيئة داخلية مريحة وصحية مع الحد الأدنى من استهلاك الطاقة تحديًا للمهندسين المعماريين، خاصة في المناطق التي يسود فيها مناخ حار وجاف. في هذه المناطق، يعد تصميم المباني المضاءة بشكل طبيعي والمريحة حراريًا مع استهلاك أقل قدر ممكن من الطاقة بمثابة تناقض تقريبًا. ومع ذلك، فإن تصميم الواجهة وخاصة الاختيار المناسب للنوافذ يبدو حاسمًا في مواجهة مثل هذا التحدي. هذه المشكلة أكثر تعقيدًا في المباني المدرسية، حيث من الضروري تحقيق التوازن الصحيح بين الضوء الطبيعي والراحة الحرارية واستهلاك الطاقة، وهو أمر صعب بشكل خاص في المناخات الحارة والجافة. يتطلب حل هذه المشكلة تطوير منهج متعدد المعايير و الذي يدمج بين البيانات المناخية والشكلية والوظيفية. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو اعتماد مثل هذا المنهج الذي يسلط الضوء على تأثير نسبة مساحة نوافذ الواجهة على أداء الإضاءة والحرارة والطاقة في الفصول الدراسية، مع اعتماد مدينة بسكرة كحالة دراسة.

تعتمد الطريقة المقترحة على ثلاثة مناهج: المفاهيمي، التجريبي والرقمي. سمح النهج المفاهيمي ببناء المعرفة النظرية حول الموضوع، وتحديد موقع الدراسة فيما يتعلق بالأدبيات الموجودة. من جانبه، استند النهج التجريبي إلى دراسة ميدانية أجريت فيها قياسات لمستويات الإضاءة ودرجات الحرارة الداخلية خلال فترات العام الدراسي الأكثر برودة وسخونة بهدف تقييم أداء الإضاءة وظروف الراحة الحرارية في الفصول الدراسية ذات مساحات نوافذ مختلفة. أخيرًا، مكّن النهج الرقمي القائم على المحاكاة باعتماد البرنامج Rhino/Grasshopper من إجراء دراسة تحسينية لمعايير تصميم نوافذ الفصل الدراسي فيما يتعلق بالظروف المناخية الحارة الجافة. بدأت العملية بالتحقق من صحة النموذج الرقمي. بعد ذلك، اشتملت اختبارات المحاكاة الأولى على تحليل التأثير المشترك لنسبة مساحة نوافذ الفصل الدراسي و أربعة عوامل رئيسية من المحتمل أن تؤثر عليها، وهي: التوجه، نوع الزجاج، جهاز التظليل، ومكونات الجدار. تم تقييم أداء النموذج من حيث مستوى الإضاءة وظروف الراحة الحرارية واستهلاك الطاقة السنوي. أخيرًا، تم تطبيق طريقة التحسين باستخدام نهج متعدد الأهداف عبر Octopus المكون الإضافي لبرنامج Grasshopper من خلال تغيير اتجاه الفصل الدراسي، تم الجمع بين مختلف نسب مساحة النوافذ/الجدار وأنواع الزجاج وأجهزة التظليل، لاستنباط الحلول المحتملة التي من شأنها تحقيق توازن جيد بين ضوء النهار والراحة الحرارية، مع ضمان انخفاض استهلاك الطاقة.

توفر النتائج نظرة ثاقبة للتفاعل بين المعلمات المختلفة لغلاف المبنى في المناخات الحارة والجافة، بالإضافة إلى مؤشرات لاستكشاف مجموعات وخيارات مختلفة ممكنة لتحسين تصميم الواجهة واختيار المناسب منها. خصائص النافذة الأكثر ملاءمة للمناخ المدرس عند دمجها في محاكاة أكثر تفصيلاً أو أهداف أداء أخرى تكون بشكل عام جزءًا من ممارسات التصميم الجيدة، يمكن أن تكون هذه المعايير أداة مفيدة لتصميم مناخي ناجح وتحسين أداء المبنى. كجزء من هذا البحث، تم استكشاف الحلول المحتملة لتوجهات مختلفة، وتقديم توصيات لنسب مساحة النافذة/الجدار في المباني المدرسية في مناخ حار وجاف. تظهر النتائج أيضًا كيف يمكن استخدام منهجية التحسين في المراحل الأولى من عملية تصميم المبنى لتحديد المعايير المعمارية الخاصة بغلاف المبنى والتي يمكن أن تضمن أدائه البيئي، من حيث الراحة وكفاءة الطاقة.

الكلمات المفتاحية

المباني المدرسية، الراحة الحرارية، الأداء الضوئي، استهلاك الطاقة، نسبة مساحة النوافذ في الواجهة، مناخ حار و جاف .

Publications

- ❖ **LAKHDARI, K., SRITI, L., & PAITER, B.** *Parametric optimization of daylight, thermal and energy performance of middle school classrooms, case of hot and dry regions.* Building and Environment. (2021) <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108173>.

- ❖ **LAKHDARI, K. & SRITI, L.** *Assessment of Façade Opening Impact on Energy Performance in School buildings Using a Parametric Design Tool, Case of a Hot and Dry Climate.* Proceedings of Engineering & Technology (PET) Special Issue on Applied Sciences & Technology. GEEE-2019 Conference, Tabarka Tunisie -PET- Vol. 49, (2019) pp. 101-104. ISSN : 1737-9334. http://ipco-co.com/PET_Journal/PET_Issues.html; [IX](http://ipco-</div><div data-bbox=)

Table des matières

Résumé.....	I
Abstract.....	III
ملخص.....	V
Publications.....	IX
Table des matières.....	X
Liste des Figures.....	XV
Liste des Tableaux.....	XVIII
Nomenclature.....	XX
Chapitre introductif	
1. Introduction.....	1
2. Problématique.....	5
3. Hypothèses.....	5
4. Objectifs de la recherche.....	6
5. Méthodologie de travail.....	6
6. Structure de la thèse.....	8
Première Partie : Cadre Théorique et Conceptuel	
Chapitre I : Architecture et performance énergétique des établissements scolaires	
Introduction.....	13
I.1 Education et architecture scolaire.....	13
I.1.1 Notions de base.....	13
I.1.1.1 Éducation.....	13
I.1.1.2 Établissements scolaires.....	14
I.1.2 Évolution de l'architecture scolaire dans le monde.....	14
I.1.2.1 Naissance de l'espace éducatif.....	14
I.1.2.2 École du père Grégoire Girard.....	15
I.1.2.3 Création d'un langage architectural : le 'Heimatstil'.....	16
I.1.2.4 École en barre.....	17
I.1.2.5 École pavillonnaire.....	17
I.1.2.6 École de plein air.....	18
I.1.2.7 Standardisation de l'architecture scolaire.....	19
I.1.2.8 École ouverte et le recloisonnement.....	19
I.1.2.9 Espaces modulables.....	20
I.1.3 Évolution du système éducatif en Algérie.....	21
I.1.3.1 Période de la Régence (antérieure à 1830).....	21

I.1.3.2 Période coloniale (de 1830 à 1962).....	21
I.1.3.3 Période postcoloniale (après 1962).....	22
I.1.4 Typologies du bâtiment scolaire	23
I.1.4.1 Typologies du bâtiment scolaire en Europe	23
I.1.4.2 Typologies du bâtiment scolaire en Algérie	24
I.1.5 Prescriptions relatives à la conception des salles de classe.....	25
I.2 Performance énergétique du bâtiment scolaire	27
I.2.1 Concept de la performance et de l'efficacité énergétique du bâtiment	27
I.2.2 Stratégies pour l'amélioration de la performance énergétique d'un bâtiment	29
I.2.3 Performance énergétique du bâtiment scolaire	30
I.2.4 Consommation énergétique du bâtiment scolaire en Algérie	31
Conclusion.....	33
Chapitre II : Confort thermiques et bâtiment scolaire en climat chaud et sec	
Introduction	35
II.1 Adaptabilité du bâtiment au contexte chaud et sec.....	36
II.1.1 Climat	36
II.1.2 Classification du climat	36
II.1.2.1 Classification de Thornthwaite.....	37
II.1.2.2 Classification de Köppen-Geiger.....	37
II.1.2.3 Classification de Martonne	38
II.1.3 Climats arides	38
II.1.3.1 Climat chaud et sec.....	39
II.1.3.2 Localisation du climat chaud et sec en Algérie	40
II.1.4 Principes de conception en climat chaud et sec	41
II.1.4.1 Forme de tissu urbain	42
II.1.4.2 Conception du bâtiment.....	42
II.1.4.3 Murs, fenêtres et matériaux	43
II.1.4.4 Couleurs.....	45
II.1.4.5 Végétation.....	45
II.2 Exigences humaines concernant le climat intérieur.....	46
II.2.1 Mécanisme du corps humain	46
II.2.2 Confort thermique intérieur	48
II.2.2.1 Habillement	49
II.2.2.2 Métabolisme	50
II.2.2.3 Température de l'air	51
II.2.2.4 Température radiante.....	51

II.2.2.5 Humidité relative	52
II.2.2.6 Vitesse de l'air.....	53
II.2.3 Mesure du confort thermique	53
II.2.3.1 Approches analytique	54
II.2.3.1.1 Modèle de Fanger PPD et PMV	55
II.2.3.1.2 Modèle à deux nœuds de Gagge.....	57
II.2.3.2 Approche adaptative.....	57
II.2.4 Normes du confort thermique.....	60
II.2.4.1 Norme ISO 7730.....	60
II.2.4.2 Norme CEN 15251	61
II.2.4.3 ASHRAE Standard 55	62
II.3 Performance thermique des établissements scolaires	63
II.3.1 Impact de l'inconfort thermique sur les élèves.....	63
II.3.2 Confort thermique dans les salles de classe.....	65
Conclusion.....	66
Chapitre III : Performance lumineuse dans les espaces scolaires	
Introduction	69
III.1 Eclairage naturel.....	69
III.1.1 Impacts physiologiques et psychologiques de la lumière naturelle.....	70
III.1.2 Stratégie de la lumière naturelle.....	71
III.1.2.1 Capter	72
III.1.2.2 Protéger	72
III.1.2.3 Transmettre	72
III.1.2.4 Distribuer.....	72
III.1.2.5 Contrôler	73
III.1.3 Standards et normes d'éclairage dans les espaces intérieurs.....	73
III.1.3.1 NF EN 12665 (novembre 2002).....	73
III.1.3.2 NF EN 12464-1 (juin 2003)	73
III.1.3.4 NF EN 12193 (mars 2008).....	74
III.1.4 Normes d'éclairage dans les salles de classe.....	74
III.2 Confort visuel.....	75
III.2.1 Méthodes de mesure et d'évaluation du confort visuel	76
III.2.1.1 Paramètres Statiques	76
III.2.1.1.1 Éclairement (E)	76
III.2.1.1.2 Uniformité (I_U)	76
III.2.1.1.3 Facteur de lumière du jour (FLJ ou DF).....	77

III.2.1.1.4 Éblouissement	78
III.2.1.1.5 Vue vers l'extérieur.....	79
III.2.1.2 Paramètres dynamiques.....	79
III.2.1.2.1 Autonomie de la lumière du jour (DA)	79
III.2.1.2.2 Éclairement utile à la lumière du jour (UDI)	80
III.2.1.2.3 Autonomie de jour continue (cDA).....	81
III.2.1.2.4 Autonomie Spatiale de Lumière du Jour (sDA).....	81
III.2.1.2.5 Exposition annuelle au soleil (ASE)	81
III.2.1.3 Modélisation de la lumière du jour basée sur le climat (CBDM).....	82
III.2.2 Confort visuel dans les salles de classe.....	82
Conclusion.....	85
Chapitre IV : Ratio d'ouverture des fenêtres des murs de la façade dans la salle de classe	
Introduction	88
IV.1 La fenêtre, un capteur de la lumière naturelle et de l'énergie solaire	88
IV.1.2 Évolution de la fenêtre	90
IV.1.3 Caractéristiques de la fenêtre	91
IV.1.3.1 Forme de la fenêtre	92
IV.1.3.2 Orientation de la fenêtre.....	92
IV.1.3.3 Emplacement de la fenêtre.....	94
IV.1.3.4 Dimensions de la fenêtre.....	94
IV.2 Performances de la protection solaire	95
IV.3 Performances du vitrage.....	98
IV.4 Le ratio d'ouverture des fenêtres de la façade (WWR) : état de l'art	99
IV.4.1 Ratio d'ouverture des fenêtres de la façade en climat chaud et sec	101
IV.4.2 Ratio d'ouverture des fenêtres de la façade et approche paramétrique.....	103
IV.4.3 Positionnement épistémologique	106
Conclusion.....	108
Deuxième Partie : Cadre Méthodologique, Analyse et Optimisation	
Chapitre V : Cas d'étude et analyse empirique	
Introduction	112
V.1 Présentation de contexte et d'objet d'étude.....	112
V.2 Sélection et analyse de l'objet d'étude	113
V.3 Interprétation des résultats de l'analyse typologique	118
V.3.1 Bloc d'enseignement	118
V.3.2 Salles de Classe	119

V.3.3 Fenêtres	119
V.3.4 Ratios des fenêtres de la façade.....	121
V.4 Protocole expérimentale	121
V.4.1 Mesures effectuées	122
V.4.2 Choix des points de mesure.....	123
V.4.3 Instrument utilisés et déroulement des prises de mesures	123
V.5 Interprétation des résultats de de la campagne de mesures	125
V.5.1 Évaluation de l’environnement lumineux	125
V.5.2 Évaluation des conditions thermiques.....	126
Chapitre VI : Etude paramétrique et optimisation multi-objectifs	
Introduction	131
VI.1 Simulation paramétrique	131
VI.1.1 Présentation du logiciel de simulation et des plug-ins exploités.....	131
VI.2 Validation lumineuse et thermique du modèle numérique.....	133
VI.2.1 Validation du modèle lumineux	134
VI.2.2 Validation du modèle thermique.....	137
VI.3 Approche paramétrique et optimisation multicritère	140
VI.3.1 Description des modèles numériques.....	142
VI.3.2 Paramètres de la simulation	143
VI.3.2.1 Ratio d’ouvertures des fenêtres de la façade.....	144
VI.3.2.2 Orientation	144
VI.3.2.3 Type de Vitrage.....	144
VI.3.2.4 Protection solaire.....	145
VI.3.2.5 Composants de parois extérieurs.....	146
VI.3.3 Indicateurs de la simulation	147
VI.3.4 Programme, Occupation et charges	147
VI.4 Résultats de l’étude paramétrique	148
VI.4.1 Comparaison entre la typologie unilatérale et bilatérale.....	148
VI.4.3 Optimisation multi-objectifs du ratio d’ouverture des fenêtres	149
Conclusion.....	153
Conclusion Générale	155
Recommandations	163
Limites de la recherche	164
Perspectives de la recherche.....	165
Bibliographie.....	168
Annexes.....	177

Liste des Figures

Figure I. 1 : Un tableau noir installés dans la chambre à coucher du maître d'école. Source : (Forster, 2004)	15
Figure I. 2 : lasse d'enseignement mutuel selon le Père Girard. Source : (Forster, 2004)	15
Figure I. 3 : Collège de Vevey, arch. Ch. Günthert, 1909. Ci-contre plan des étages. Source : (Forster, 2004)	16
Figure I. 4 : École Meerweinstraße à Hambourg. 1927-1930. Source : (Châtelet & Le Cœur, 2004)...	17
Figure I. 5 : Les classes de l'école pavillonnaire de Suresnes construite par Eugène Beaudouin et marcel Lods de 1931 à 1934. Source : (https://books.openedition.org , consulté le 17/05/2021)	18
Figure I. 6 : École de plein air d'Amsterdam, par Jan Duiker et Bernard Bijvoet, 1927-1930. Source : (http://www.architectureguide.nl , consulté le 17/05/2021).....	19
Figure I. 7 : Typologies des bâtiments scolaires. Source : (Rigolon, 2010).....	24
Figure I. 8 : Typologie des bâtiments scolaires en Algérie. Source : (Ivanova, 2019) adaptée par l'auteur.	25
Figure I. 9 : (a) Formes des salles de classe, (b) Dimensions recommandées pour une salle de classe ordinaire. Source : (Neufert, 1996; Saddok, 2015).	26
Figure I. 10 : La consommation finale d'énergie en Algérie par produit. Source : (MEM, 2019).....	32
Figure I. 11 : La consommation finale d'énergie en Algérie par secteur. Source : (MEM, 2019).....	32
Figure II. 1 : Classification des climats arides selon la méthode Köppen, (Source : www.wikiwand.com/en/Desert_climate , adaptée par l'auteur, 2020.)	39
Figure II. 2 : Le climat chaud et sec en Algérie. Source : (Mokhtari, 2008) adaptée par l'auteur.	41
Figure II. 3 : Modèles urbains des zones chaudes et sèches. Source : (Gut & Ackerknecht, 1993)	42
Figure II. 4 : Orientation optimale du bâtiment, (b) maison à patio une conception typique en climat chaud et sec. Source : (Gut & Ackerknecht, 1993)	43
Figure II. 5 : (a) La masse de stockage à l'intérieur de l'isolant est efficace, (b) Placement des ouvertures. Source : (Gut & Ackerknecht, 1993).....	44
Figure II. 6 : Végétation adaptée avec le climat chaud et sec. Source: (Gut & Ackerknecht, 1993)	46
Figure II. 7 : Interactions thermiques entre l'homme et son environnement. Source: (Gut & Ackerknecht, 1993)	48
Figure II. 8: Effet de la température radiante sur la température opérative. Source: (Liébard & De Herde, 2005).....	52
Figure II. 9 : Relation entre le PMV et le PPD. Source: (Robillart, 2015).....	56
Figure II. 10 : Diagramme de modèle adaptative selon la Norme ASHRAE 55-2017. Source : (https://comfort.cbe.berkeley.edu , Consulté le 24/01/2021)	59
Figure II. 11 : Mécanismes de l'approche adaptative. Source: (Moujelled, 2007).	59
Figure II. 12 : Pourcentage des recherches effectuées sur le confort thermique dans chaque type de climat. Source: (Singh et al., 2018)	66
Figure III. 1 : Calcul du FLJ (DF). Source : (Benharkat, 2006).....	78
Figure IV. 1 : Evolution de la fenêtre. Source : (Jacquier et al., 2012).....	91
Figure IV. 2 : Formes des fenêtres. Source : (https://www.systemed.fr)	92
Figure V. 1 : Localisation géographique de la ville de Biskra, Source : (Azzouzi, 2019).....	113
Figure V. 2 : Localisation des Etablissements choisis sur la carte de la ville de Biskra. Source : (Auteur, 2018)	Error! Bookmark not defined.
Figure V. 3 : Grille des points des mesures thermiques et lumineuses dans une salle de classe, Source : (Auteur, 2019).....	125

Figure VI.1 : (A) Honeybee (B) Ladybug plug-ins pour grasshopper 3D. (Source: https://parametricmonkey.com)	132
Figure VI. 2 : Modélisation sous Grasshopper & Rhino3D du bloc d'enseignement de l'école devant servir à l'étude paramétrique. Source : (Auteur, 2019).....	133
Figure VI. 3 : Comparaison entre les températures mesurées (a) et simulées (b), pendant le jour d'hiver. (Source : Auteur, 2019).....	139
Figure VI. 4 : Comparaison entre les températures mesurées (a) et simulées (b), pendant le jour d'été. Source : (Auteur, 2019).....	139
Figure VI. 5 : Schéma explicatif de la méthodologie de l'évaluation paramétrique. Source : (Auteur, 2020).....	141
Figure VI. 6 : Schéma explicatif de la méthodologie de l'optimisation paramétrique. Source : (Auteur, 2020).....	142
Figure VI. 7 : Modélisation des deux bâtiments pris comme cas d'étude : typologie unilatérale (gauche), et typologie bilatérale (droite) (Source : Auteur, 2019).....	143
Figure VI. 8: Modèle d'une salle de classe. Source : (Auteur, 2020).	143
Figure VI. 9 : Différent ratio d'ouverture considérés pour la simulation (Source : Auteur, 2019).....	144
Figure VI. 10 : Calcul de la protection solaire optimale pour des salles de classes situées dans la région de Biskra. Source : (Auteur, 2020).	146
Figure VI. 11 : Impact du changement de l'orientation sur la performance lumineuse du ratio d'ouverture selon les deux configurations. Source : (Auteur, 2020).	Error! Bookmark not defined.
Figure VI. 12 : Impact du changement de l'orientation sur la performance thermique de ratio d'ouverture dans la typologie unilatérale. Source : (Auteur, 2020).....	Error! Bookmark not defined.
Figure VI. 13 : Impact du changement de l'orientation sur la performance thermique de ratio d'ouverture dans la typologie bilatérale. Source : (Auteur, 2020).....	Error! Bookmark not defined.
Figure VI.14 : Impact de l'orientation sur la performance énergétique du ratio d'ouverture pour la typologie unilatérale (Source : Auteur, 2020).....	Error! Bookmark not defined.
Figure VI. 15 : Impact du changement de l'orientation sur la performance énergétique du ratio d'ouverture pour la typologie bilatérale. Source : (Auteur, 2020).	Error! Bookmark not defined.
Figure VI. 16 : Impact du changement de type de vitrage avec le ratio d'ouverture sur la performance lumineuse dans une salle de classe orientée vers le Sud (Source : Auteur, 2020).	Error! Bookmark not defined.
Figure VI.17 : Impact du changement de type de vitrage sur la performance thermique de ratio d'ouverture en termes de la température annuelle moyenne dans une salle de classe orientée vers le Sud (Source : Auteur, 2020).....	Error! Bookmark not defined.
Figure VI. 18 : Impact du changement de type de vitrage sur la performance énergétique de ratio d'ouverture dans une salle de classe orientée vers le Sud (Source : Auteur, 2020).....	Error! Bookmark not defined.
Figure VI. 19 : Impact de la protection solaire sur la performance lumineuse de ratio d'ouverture dans une salle de classe orientée vers le Sud. Source : (Auteur, 2020).	Error! Bookmark not defined.
Figure VI. 20 : Impact de la protection solaire sur la performance thermique de ratio d'ouverture dans une salle de classe orientée vers le Sud (Source : Auteur, 2020).	Error! Bookmark not defined.
Figure VI. 21 : Impact de la protection solaire sur la performance énergétique de ratio d'ouverture dans une salle de classe orientée vers le Sud (Source : Auteur, 2020).	Error! Bookmark not defined.
Figure VI. 22 : Impact de la composante des parois extérieures sur la performance thermique du ratio d'ouverture en termes de température moyenne mensuelle. Source : (Auteur, 2020).	Error! Bookmark not defined.

Figure VI. 23 : Impact de la composante des parois extérieures sur la température opérative pendant le solstice d'été et le solstice d'hiver. Source : (Auteur, 2020). **Error! Bookmark not defined.**

Figure VI. 24 : Impact de la composante des parois extérieures sur la performance énergétique du ratio d'ouverture. Source : (Auteur, 2020). **Error! Bookmark not defined.**

Figure VI. 25 : La recherche de la solution optimale à l'aide de « Octopus » plug-in. Source : (Auteur, 2020). 151

Liste des Tableaux

Tableau II. 1 : Le niveau d'habillement exprimer en 'clo'. Source : (Auliciems et Szokolay 1997).....	50
Tableau II. 2 : Divers valeurs du métabolisme selon le niveau d'activité (Source : Auliciems et Szokolay 1997)	50
Tableau II. 3 : Echelle des indices PMV (Source : Robillart, 2015)	56
Tableau II. 4 : La relation entre les valeurs SET et la sensation thermique. Source: (Moujalled, 2007)	57
Tableau II. 5 : Températures opératives recommandées selon la norme ISO7730. Source : (Belkhouane et al., 2017)	61
Tableau II. 6 : Catégories de confort thermique selon l'EN ISO 7730 et l'EN 15251. Source: (Allab, 2017)	62
Tableau III. 1 : les niveaux d'éclairément suggérés selon 5 normes. Source :(Piderit Moreno, 2011) ..	75
Tableau III. 2 : Exigences de confort visuel dans les salles de classe. Source : (EN12464-1, 2002) ...	83
Tableau V. 1 : Critères d'analyse typologique des établissements scolaires Source: (auteur, 2019)...	114
Tableau V. 2 : Analyse typologique des 18 établissements scolaires sélectionnés dans la ville de Biskra	116
Tableau V. 3 : Classification des écoles selon la surface des Fenêtres	117
Tableau V. 4 : Classification des écoles selon le rapport de la surface des fenêtres sur la surface de plancher des salles de classe (Ratio fenêtres/ plancher).....	117
Tableau V. 5 : Rapports de la surface des fenêtres sur la surface des murs extérieurs des salles de classe	117
Tableau V. 6 : Les 3 cas d'étude sélectionnées, Source : (Auteur, 2018).....	121
Tableau V. 7 : Caractéristiques techniques de l'appareil anémomètre Testo 480 et des sondes utilisées pour les prises de mesures. Source : (Fiche des données techniques de l'appareil).	124
Tableau V. 8 : Distribution de l'éclairément dans les salles de classe au niveau du plan de travail. Source : (Auteur, 2020).....	Error! Bookmark not defined.
Tableau V. 9 : Les mesures thermiques dans les salles de classe. Source : (Auteur, 2019).....	126
Tableau VI. 1 : Visualisation de la distribution des éclairéments sur le plan de travail et comparaison entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées, Le 21 Décembre 2018. Source : (Auteur, 2020)	135
Tableau VI. 2 : Visualisation de la distribution des éclairéments sur le plan de travail et comparaison entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées, Le 26 Juin 2018. Source : (Auteur, 2020) .	135
Tableau VI. 3. Comparaison des valeurs d'éclairément mesurées et simulées pour les 20 points de référence et calcul des RE correspondant à chaque point de mesure pour la journée d'hiver. Source : (Auteur, 2020).....	Error! Bookmark not defined.
Tableau VI. 4 : Comparaison des valeurs d'éclairément mesurées et simulées pour les 20 points de référence et calcul des RE correspondant à chaque point de mesure pour la journée d'hiver. Source : (Auteur, 2020).....	Error! Bookmark not defined.
Tableau VI. 5 : Caractéristique des matériaux de l'enveloppe du bâtiment. Source: (DTR C 3-2 1997 Documentation Technique Réglementaire du Ministère du Logement, Algérie)	137
Tableau VI. 6 : Différents types de vitrage considérés. Source : (Auteur, 2019).	144
Tableau VI. 7 : Types de murs considérés et propriétés des matériaux utilisés. Source: (DTR C 3-2 1997 Documentation Technique Réglementaire du Ministère du Logement, Algérie).	146

Tableau VI. 8 : Comparaison entre les deux modèles unilatéral (A), et bilatéral (B) exprimée en termes de performances lumineuses (UDI) et énergétiques (EUI). Source : (Auteur, 2020).	149
Tableau VI. 9 : Le ratio d'ouverture optimal pour différentes configurations des salles de classe. Source : (Auteur, 2020).....	152

Nomenclature

IDM: Indice d'aridité de Martonne

PMV: Predicted Mean Vote

PPD: Predicted Percentage of Dissatisfied

SET: Température Effective Standard

ISO: International Standard Organisation

CEN: Comité Européen de Normalisation

ASHRAE: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers

CIE: Commission Internationale de l'Eclairage

DA : Daylight Autonomy

UDI: Useful daylight illuminance

cDA: Continuous Daylight Autonomy

sDA: Spatial Daylight Autonomy

ASE: Annual sun exposure

UGR: Unified Glare Rating

CRI: Color Rendering Index

WWR: Window-to-wall ratio

SHGC: solar heat gain coefficient

EUI: Energy Use intensity

RMSE: Root Mean Square Error

MAE: Mean Absolute Error

ACP: Adaptive Comfort Percentage

HVAC: Heating, Ventilation, and Air Conditioning

Chapitre introductif

1. Introduction

Considérant les nouveaux défis environnementaux, le BTP (Bâtiment et Travaux Publics) est l'un des secteurs clés dans lesquels il est possible d'intervenir et d'effectuer des changements rapides et durables. La performance du bâtiment est un concept important dans la production du cadre bâti d'aujourd'hui; il est souvent utilisé dans les domaines de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction, car le bâtiment est classé comme un secteur énergivore. Il représente plus de 40% de la consommation énergétique mondiale et contribue à plus de 30% des émissions de CO₂ (Saussay et al., 2016). L'amélioration de la performance des bâtiments nécessite une compréhension et une intégration approfondies d'une variété d'indicateurs liés à de nombreux facteurs axés sur des questions telles que l'efficacité énergétique des bâtiments, la qualité de l'environnement intérieur, le confort thermique des occupants, ... etc.

À l'échelle mondiale la consommation énergétique du bâtiment suscite beaucoup d'intérêt. Dans les pays développés, le secteur du bâtiment (résidentiel, commercial et tertiaire) représente entre 20% et 40% de la consommation totale d'énergie (Pérez-Lombard et al., 2008). Mais la situation est encore plus critiques pour les pays émergents ; à titre d'exemple, il représente en Algérie environ la moitié de la consommation nationale totale d'énergie (Saddok, 2015). Par ailleurs, du fait du changement climatique à l'échelle planétaire, la réduction des besoins énergétiques pour le chauffage des locaux dans les climats froids et le refroidissement des locaux dans les climats chauds sont parmi les préoccupations les plus pressantes au monde. Une grande partie de cette énergie étant utilisée pour assurer le confort thermique des bâtiments (Yang, 2014). En conséquence, de nombreux chercheurs du monde ont été attirés par la question d'assurer les conditions de confort thermique comme une exigence fondamentale dans l'environnement bâti. À ce titre, les concepteurs doivent fournir les réponses nécessaires, étant donné que les gens passent entre 80 et 90% de leurs journées dans les espaces intérieurs (Rupp et al., 2015).

L'enveloppe et sa performance thermiques représentent le point de départ pour rendre un bâtiment énergétiquement efficace. La façade, en particulier, a un impact significatif puisqu'elle représente un lieu d'interaction et d'échange entre l'intérieur et l'extérieur. En effet, mis à part les composants du toit et le type de fondation, les niveaux d'isolation, le type et la taille des fenêtres, la masse thermique et la protection solaire sont tous des facteurs qui influencent l'efficacité énergétique du bâtiment et déterminer les conditions thermiques et visuelles.

Les surfaces vitrées de la façade déterminent l'ampleur de les échanges thermique du bâtiment, une orientation inappropriée ou bien un type de vitrage mal choisi peuvent augmenter négativement les gains ou les pertes de la chaleur, ce qui contribue à affecter le confort thermique des occupants. Les fenêtres ont un effet considérable sur la consommation d'énergie du bâtiment; ils sont responsables d'une grande partie du gain et de la perte de chaleur qui se produisent simultanément au niveau de l'enveloppe du bâtiment (Winterbottom & Wilkins, 2009).

La valeur du ratio d'ouverture des fenêtres de la façade est un choix qui s'opère aux premières étapes de la conception architecturale; par conséquent, il est difficile ou impossible de le changer plus tard. Selon les études antérieures, le ratio d'ouverture des fenêtres de la façade a un effet significatif à la fois sur l'utilisation de l'énergie du bâtiment, le confort thermique des usagers et la qualité d'éclairage naturel. En règle générale, la performance de l'éclairage naturel augmente lorsque le ratio d'ouverture augmente, cependant, les gains de chaleur solaire seront proportionnellement augmentés.

De ce point de vue, le maintien d'un environnement intérieur confortable et sain avec un minimum de consommation d'énergie est un défi pour les architectes surtout dans les régions où prédomine un climat chaud et aride. Dans ces régions en effet, concevoir des bâtiments naturellement éclairés, thermiquement confortables tout en consommant le moins d'énergie possible relève presque du paradoxe. Or, la conception de la façade et surtout le choix approprié de la surface transparente semble être décisif pour relever un tel défi et assurer des bâtiments à 'zéro énergie' (Vanhoutteghem et al., 2015). Le problème est encore plus complexe dans les bâtiments scolaires où il est impératif d'assurer un confort à la fois lumineux et thermique dans les salles de classes. Résoudre ce problème nécessite le développement d'une approche multicritère qui intègre les données climatiques, formelles et fonctionnelles.

Il est bien connu que tous les systèmes éducatifs du monde appliquent différentes étapes d'apprentissage en fonction de l'âge des apprenants qui font que les élèves âgés de deux à vingt-six ans passent de longues périodes de temps dans les écoles (Singh et al., 2018). La salle de classe, en particulier, est un lieu où les élèves et les enseignants se réunissent pendant de longues périodes pour participer à des activités éducatives. À chaque niveau d'éducation, les programmes d'études exigent différentes approches de l'apprentissage et différentes formes de réflexion systématique, ainsi que des niveaux de concentration plus élevés. L'environnement créé au cours de ces activités a un impact sur la réussite des élèves (Puteh et al., 2012).

Concevoir un espace éducatif n'est pas une tâche facile, car il affecte directement l'avenir de l'humanité à savoir, le développement de la personnalité individuelle, et l'intégration sociale tout en garantissant un environnement sain et confortable. La relation entre l'environnement et l'apprentissage nécessite d'un niveau minimum de confort pour se concentrer sur les études. En effet, les bâtiments scolaires par leur fonction et leur mode d'occupation se distinguent par une conception architecturale assez particulière. Küller and Lindsten (1992) affirment que les écoles et les bâtiments de bureaux requièrent des niveaux d'éclairage et une ventilation naturelle. Ces exigences se répercutent sur la morphologie de tels bâtiments puisqu'ils apparaissent souvent avec des formes articulées permettant de grandes surfaces de murs extérieurs et un maximum de surfaces vitrées.

La conception de la fenêtre a un impact direct sur la consommation d'énergie pour le chauffage et le refroidissement du fait qu'elle est responsable d'une grande partie de la perte (ou du gain) de chaleur qui se produit au niveau de l'enveloppe du bâtiment. En règle générale, la performance de l'éclairage naturel est meilleure lorsque le rapport surface fenêtre/paroi augmente, en même temps, les gains de chaleur solaire seront augmentés à mesure que ce rapport augmente (Muhaisen & Dabboor, 2013). Autrement dit, plus le ratio d'ouverture de la façade augmente, plus il y aura d'échanges de chaleur entre l'environnement et le bâtiment et plus ce dernier consommera de l'énergie pour réguler les ambiances intérieures. De ce point de vue, l'un des objectifs de conception les plus importants pour les bâtiments scolaires est de parvenir à un équilibre entre la lumière naturelle, le confort thermique et la consommation d'énergie. Un éclairage excessif ou insuffisant, par exemple, a des effets négatifs sur le comportement de satisfaction et de productivité des professeurs et des élèves, ainsi que sur les performances scolaires des apprenants (A. Zhang et al., 2017). De plus, la qualité de l'environnement intérieur a un impact direct sur les performances intellectuelles et le comportement des élèves dans les écoles. Des études récentes ont montré que la qualité architecturale des établissements scolaires un impact direct sur l'efficacité de l'éducation, ainsi que les taux de la réussite scolaire. Par conséquent, l'architecture devrait avoir des caractéristiques qui fournissent un environnement stimulant et adapté aux différentes variétés de situations pédagogiques pour améliorer le processus éducatif (Puteh et al., 2012).

En Algérie la réalisation des écoles a dû faire face à la demande pressante du manque d'infrastructures induite par la poussée démographique et l'institutionnalisation du droit à l'enseignement. La construction étaient régie par des plans types largement reproduits pour répondre aux critères d'économie et de rapidité d'exécution. Cependant, les conséquences

résultant de cette stratégie se révélèrent catastrophiques du point de vue de la qualité des espaces produits. Souvent, les bâtiments réalisés n'assuraient pas le minimum requis en termes de confort thermique et de niveau d'éclairage, ce qui les rendait fortement dépendants de l'énergie pour leur fonctionnement.

Dans les régions à climat chaud et aride le problème est encore plus compliqué. Ces zones aux conditions climatiques difficiles représentent plus de 85% de la superficie totale de l'Algérie. Dans ce type de conditions climatiques, le besoin en énergie de refroidissement représente la majorité de la consommation d'énergie dans le bâtiment. Ainsi, dans les établissements scolaires, les principaux facteurs qui augmentent la charge thermique dans les salles de classe sont le gain de chaleur interne et le gain solaire à travers l'enveloppe extérieure. Ces dernières années, la qualité de la construction et de la conception des écoles publiques s'est considérablement améliorée. Cependant, la plupart des écoles algériennes existantes ont été construites sans se soucier des stratégies de conception passive qui auraient pu adapter ces bâtiments à des conditions climatiques aussi sensibles.

Concevoir des bâtiments à faible consommation énergétique tout en assurant le confort thermique et lumineux reste un défi pour les chercheurs et académiciens d'aujourd'hui. Les architectes et les ingénieurs envisagent les moyens d'améliorer le confort environnemental de l'utilisateur tout en assurant la performance énergétique du bâtiment. Cependant, il y a relativement peu d'études menées dans le sens où les trois critères lumineux, thermique, et énergétique sont évalués et améliorés simultanément. Nombreuses études ont traité l'impact de la taille des fenêtres sur la performance énergétique du bâtiment (El Deeb, 2013; Raji et al., 2017; Rashid et al., 2016). Selon ces études, les chercheurs ont montré que la consommation énergétique du bâtiment diminue lorsque la conductivité U du vitrage est minimisée, et que les grandes surfaces des fenêtres ne sont pas adaptées aux conditions climatiques chaudes et arides. Un grand ratio d'ouverture de la façade signifie que plus de chaleur sera échangée entre l'environnement et le bâtiment. Ce qui affectera le confort de l'environnement intérieur et entraînera une demande d'énergie plus élevée pour réguler l'environnement intérieur par le refroidissement. La combinaison entre l'effet du ratio d'ouverture des fenêtres de la façade sur la performance lumineuse et thermique ainsi que l'efficacité énergétique a toujours été un problème en raison de la complexité de l'opération. Les bâtiments scolaires, en particulier, devraient pouvoir fournir un environnement éducatif approprié pour assurer les activités d'apprentissage. Par conséquent, concevoir un espace scolaire à lumière naturelle adéquate et qui soit thermiquement confortable tout en consommant le moins d'énergie possible est presque

un paradoxe.

2. Problématique

Il est nécessaire de mettre en évidence la problématique de la performance climatique des bâtiments éducatifs, en particulier en Algérie où il y a un manque de directives devant promouvoir une conception climatique appropriée permettant aux architectes de fournir des bâtiments scolaires performants.

Le ratio d'ouverture des murs de la façade est une variable importante affectant la qualité de l'environnement intérieur du bâtiment, il est, donc, nécessaire d'investiguer son impact sur l'éclairage naturel, le confort des usagers ainsi que la consommation énergétique. La conception architecturale des établissements scolaires, et plus spécifiquement dans les régions à climat chaud et aride, nécessite de réduire le ratio d'ouverture des murs de la façade pour minimiser les transferts thermiques, mais jusqu'à quel degré ? Sachant que cette réduction influence en premier lieu le confort visuel intérieur.

Ce travail de recherche vise à comprendre la relation entre le ratio d'ouverture des murs de la façade et la performance lumineuse, thermique et énergétique du bâtiment scolaire (salle de classe) sous les conditions climatiques chaudes et arides du sud de l'Algérie. À travers cette étude, nous essaierons de répondre aux questions suivantes :

- Quel est l'impact du ratio d'ouverture des murs de façade sur la performance lumineuse, thermique et énergétique d'un bâtiment scolaire sous les conditions d'un climat chaud et aride?
- Quel sont les différents paramètres affectant la performance de l'enveloppe du bâtiment? Et comment peuvent-ils contribuer à optimiser le ratio d'ouverture des murs de façade ?
- Quel est le ratio d'ouverture optimal qui assure le bon équilibre entre la performance lumineuse, thermique et énergétique dans une salle de classe sous un climat chaud et aride ?

3. Hypothèses

La maîtrise du ratio d'ouverture de la façade par le concepteur joue un rôle important dans la performance environnementale du bâtiment scolaire. En même temps, le ratio d'ouverture des murs de façade est subordonné à plusieurs paramètres dont la taille des fenêtres, l'orientation, le type de vitrage, et la protection solaire. De ce point de vue, la présente étude admet les

hypothèses suivantes :

1. Le ratio de fenêtre de la façade a une influence sur la quantité et la qualité de l'éclairage naturel assurées dans les salles de classe ainsi que sur les conditions de confort thermique ressenties par les utilisateurs.
2. L'optimisation de la performance énergétique des salles de classe sera réalisée à travers la maîtrise du ratio d'ouverture de la façade.
3. Différents paramètres affectent la performance des fenêtres et, notamment, la taille des fenêtres (ratio d'ouverture), l'orientation, le type de vitrage, et la protection solaire.

4. Objectifs de la recherche

L'objectif majeur de la présente recherche est d'analyser la relation entre le ratio d'ouverture des murs de la façade et la performance lumineuse, thermique et énergétique du bâtiment scolaire pour ensuite optimiser les paramètres de conception des fenêtres des salles de classe relativement aux conditions climatiques chaudes et arides du sud de l'Algérie. Ainsi, cette étude vise à :

- Déterminer des valeurs précises définissant des ratios d'ouvertures des murs de façade sous forme de recommandations pratiques pour la conception des salles de classe dans les régions chaudes et arides.
- Proposer une méthodologie d'optimisation multicritères de la performance environnementale des établissements scolaires basée sur une approche paramétrique destinée à assurer un éclairage naturel adéquat, un confort thermique acceptable et une consommation énergétique rationnelle.
- Définir les paramètres de conception des fenêtres qui peuvent contribuer à optimiser le ratio d'ouverture et la performance du bâtiment du point de vue de la trilogie éclairage naturel-confort thermique-consommation énergétique.
- Éviter le problème de surchauffe dans les salles de classe et réduire l'impact des rayons solaires défavorables par les ouvertures dans la région chaude et aride, tout en assurant le confort lumineux.
- Assurer le confort thermique des utilisateurs des salles de classe et réduire la consommation d'énergie du bâtiment scolaire.

5. Méthodologie de travail

Afin d'atteindre les objectifs escomptés par la présente recherche, un cadre méthodologique a

été élaboré ; il s'appuie sur trois approches fondamentales : conceptuelle, empirique et numérique.

L'approche conceptuelle consiste à créer une base de connaissances théoriques sur le thème traité à travers une revue de littérature ciblée de différents sources bibliographiques (ouvrages, thèses, articles,.. etc.) couvrant les concepts et mots-clés du sujet. Cette étape vise à approfondir notre connaissance sur certaines notions de base de même qu'elle permet d'identifier l'état de l'art relatif au sujet traité.

L'approche empirique relève d'une étude réalisée in situ. Elle commence par une analyse typologique de différents établissements scolaires situés dans la ville de Biskra. Cette étude préalable vise à prendre connaissance de la réalité de l'objet de la recherche et, par la suite, sélectionner un ensemble de bâtiments scolaires pouvant servir en tant que corpus d'étude. À ce titre, le travail d'investigation a été focalisé sur la collecte de documents graphiques sous forme de plans architecturaux des exemples à analyser. En outre, des visites sur terrain ont été effectués avec prise de photos et parfois élaboration des relevés pour compléter les informations manquantes.

À l'issue de ce travail de terrain, plusieurs écoles avec des ratios d'ouverture différents ont été sélectionnées pour servir comme cas d'étude. Ainsi, dans l'étape suivante, l'évaluation quantitative de l'éclairage naturel et des gains thermiques dans les salles de classe pouvait être engagée. Les prises de mesures ont été effectuées durant les périodes la plus froide et la plus chaude de l'année scolaire, le but étant l'évaluation de la performance lumineuse et thermique des salles de classe qui présentaient des ratios d'ouvertures différents, des orientations différentes, ...etc. Les mesures thermiques effectuées ont porté sur la température de l'air intérieur et extérieur, l'humidité relative intérieure et extérieure ainsi que la vitesse de l'air. Par contre, l'évaluation de la lumière naturelle s'est faite en mesurant l'éclairement horizontal intérieur reçu au niveau du plan de travail par rapport à de nombreux points de la salle de classe.

Après la collecte de données et le traitement des résultats de la partie empirique, la troisième étape fondée sur une approche numérique a pu être entamée. Cette étape consistait à mener une étude paramétrique basée sur la simulation par un logiciel Rhino/Grasshopper. Le processus a commencé d'abord par la calibration-validation du modèle numérique, en simulant le fonctionnement du cas d'étude du point de vue éclairage naturel et conditions de confort thermique et en comparant avec les résultats des mesures effectuées sur terrain. Une fois le

modèle validé, les premiers tests de simulation consistaient à analyser l'impact combiné du ratio d'ouverture des fenêtres de la salle de classe avec chacun des quatre paramètres clés susceptibles de l'affecter à savoir : orientation, type de vitrage, dispositif d'ombrage, a composante des parois. L'évaluation de la performance du modèle s'est faite en termes de niveau d'éclairage, conditions de confort thermique, et consommation énergétique annuelle. Finalement, une méthode d'optimisation multi-objective a été appliquée via le plug-in Octopus pour déterminer le ratio optimal qui permet d'atteindre le juste équilibre entre les trois aspects précédents.

6. Structure de la thèse

Le travail de recherche a été réalisé selon deux étapes principales: une première étape théorique, dans laquelle ont été définis les concepts-clés liés aux hypothèses, et la deuxième analytique dédiée à la vérification expérimentale des liens entre les variables selon un cadre méthodologique préalablement élaboré. Le manuscrit qui décrit les étapes de la recherche se divise en deux parties et se structure en six chapitres en plus d'un chapitre introductif et d'une conclusion générale.

Première partie : Cadre théorique et conceptuel

Cette section est basée sur une analyse bibliographique destinée à clarifier les notions et les concepts qui supportent la recherche. Elle est divisée en quatre chapitres:

Chapitre I : il investit les concepts-clés et les notions fondamentales liés à l'éducation, à la naissance de l'espace éducatif et à l'évolution historique de l'architecture scolaire dans le monde et en Algérie. Ensuite, cette section examine les différentes typologies des établissements scolaires et se penche sur la notion d'efficacité énergétique et sa relation à l'architecture des bâtiments éducatifs.

Chapitre II : il aborde la notion de confort thermique et de l'adaptabilité climatique du bâtiment dans un environnement chaud et aride. Il commence par identifier le climat et ses éléments, pour ensuite se focaliser sur le climat chaud et sec en Algérie. Enfin, il décrit les stratégies et les principes de conception adaptés au climat chaud et sec. La deuxième partie du chapitre est consacrée au confort thermique. Les exigences humaines concernant le climat intérieur sont clarifiées, le confort thermique est défini et de même que ses indices avant de passer au mécanisme d'ajustement du corps humain avec le climat intérieur. Finalement, les normes

relatives au confort thermique sont présentées, de même que l'importance du confort thermique et ses exigences dans les établissements scolaires.

Chapitre III : il présente de manière détaillée des notions fondamentales liées à l'éclairage naturel et le confort visuel, de même qu'il fournit un ensemble de stratégies propres à assurer l'éclairage naturel adéquat. En dernier lieu, le chapitre s'intéresse au confort visuel dans les salles de classe, il définit les standards et normes du confort lumineux après avoir abordé les notions d'éclairage et d'éclairagisme.

Chapitre IV : il s'intéresse aux ouvertures et leur rôle de la fenêtre en tant que modulateur environnemental. Le chapitre s'arrête sur l'impact du ratio d'ouverture des murs de façade relativement aux performances du bâtiment scolaire en climat chaud et aride. Un état de l'art sur le sujet traité et le positionnement épistémologique de cette étude par rapport au champ des recherches existantes sont également fournis.

Deuxième partie : Cadre méthodologique, analyse et optimisation

Cette section présente le cas de l'étude, décrit la méthodologie, notamment, les techniques d'investigation et les outils utilisés dans la recherche. L'analyse des données, les résultats obtenus et leur discussion sont également fournis. Cette partie se décline en deux chapitres, qui sont les suivants:

Chapitre V : il présente l'étude empirique réalisée sur un corpus d'établissements scolaires de type CEM situés dans la ville de Biskra. L'étude consacrée à la prise des mesures sur le terrain a été précédée par une présentation des données climatiques du contexte de l'étude soit la ville de Biskra, ainsi qu'une analyse typologique des différents établissements scolaires pour aboutir à la sélection des cas d'étude. Le chapitre décrit successivement les bâtiments choisis pour l'analyse ainsi que le protocole empirique élaboré pour la prise de mesures. Enfin, l'évaluation quantitative de l'éclairage naturel et du fonctionnement thermique des salles de classe étudiées, de même que l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus sont fournies.

Chapitre VI : ce dernier chapitre présente les étapes de l'étude paramétrique multicritères et l'optimisation effectuée sur la base d'une simulation numérique via le logiciel Rhino/Grasshopper. Une validation préliminaire a été effectuée. Enfin, l'optimisation paramétrique a permis de rechercher et de fournir le meilleur ratio qui assure un juste équilibre entre les trois facteurs de performance environnementale étudiés.

Enfin, la thèse est parachevée par une conclusion générale qui récapitule les résultats généraux obtenus, répond aux principales questions de la problématique, donne un ensemble de recommandations, s'arrête sur les limites de l'étude et enfin suggère de futures axes de recherche.

*Première Partie : Cadre Théorique et
Conceptuel*

*Chapitre I : Architecture et
performance énergétique des
établissements scolaires*

Introduction

Ce chapitre commence par clarifier les concepts fondamentaux liés à l'architecture scolaire, pour ensuite, donner une rétrospective sur l'évolution de la conception des écoles au fil du temps au niveau international puis en Algérie. Trois grandes périodes du développement des établissements éducatifs algériens seront examinées, soient : 1/ avant la colonisation, 2/ pendant la présence coloniale et 3/ après l'indépendance. La question de la performance énergétique relativement aux bâtiments scolaires, sera explorée, et le sujet de la consommation d'énergie dans le monde et en Algérie sera également abordé.

I.1 Education et architecture scolaire

Les établissements scolaires sont des lieux vivants avec des activités particulières qui se reflètent sur la conception de ces bâtiments, leur fonction et leur mode d'occupation. Ces lieux dédiés à l'apprentissage et à l'enseignement ont connu un développement au tout long de l'histoire et continuent à évoluer afin de mieux s'adapter aux nouvelles exigences d'un monde en perpétuel développement (Saddok, 2015). Ils sont une combinaison d'approches pédagogiques, de traditions de conception et de lignes directrices pour l'environnement physique, s'étalant sur plusieurs décennies (Kwok, 1997).

I.1.1 Notions de base

L'école est un véritable pilier de n'importe quelle société, et le deuxième milieu après la famille où l'enfant passe la majorité de son temps à développer ses connaissances sous la surveillance d'adultes. Dans la partie qui suit, les terminologies essentielles liées à l'école seront examinées.

I.1.1.1 Éducation

L'éducation est un droit humain fondamental et un facteur important de développement économique et social, elle est aussi la clé du développement durable et de la paix entre les pays. Cette notion est défini par l'article 26 de la déclaration universelle des droits de l'homme en 1948 affirmant que l'enseignement primaire doit être gratuit et obligatoire et que l'accès à l'enseignement supérieur doit être généralisé et ouvert à tous en fonction du mérite (Guttman, 2003).

I.1.1.2 Établissements scolaires

Les écoles ont longtemps été décrites comme des établissements d'enseignement qui accueillent les élèves pour les éduquer à des périodes précises en fonction de leurs âges. Les bâtiments scolaires sont l'un des éléments du système interdisciplinaire ; ils ont été assimilés à des 'machines à apprendre', au même titre que la maison devait être une 'machine vivante' comme le déclarait le franco-suisse architecte le Corbusier (1923). En général, ces bâtiments sont conçus spécialement pour réaliser des activités spécifiques, cours, débats, découvertes et apprentissages individuels. La qualité de l'enseignement est étroitement liée à la conception architecturale, non seulement, en vue de réaliser des murs qui délimitent l'espace, mais également créer une ambiance adéquate qui doit être adaptées à tous les âges (Beynon, 1998).

I.1.2 Évolution de l'architecture scolaire dans le monde

Dans les temps anciens, l'école était une pratique qui n'avait pas d'espace réservé auparavant, le savoir se transmettait à travers les multiples activités de la vie quotidienne, l'éducation pouvait simplement se faire dans le jardin où se trouvait l'enseignant. Jusqu'à la fin du Moyen Âge, des cours étaient offerts à l'intérieur ou à l'extérieur du monastère. Il s'agit généralement d'une pièce dans un bâtiment public ou dans la maison du professeur, ces pièces ne sont pas uniquement utilisées pour les activités scolaires (Forster, 2004)

I.1.2.1 Naissance de l'espace éducatif

Pendant la période de l'Ancien Régime (France), les premiers établissements scolaires étaient des écoles prestigieuses réservées aux enfants des familles nobles et bourgeoises. Il n'existait pas de bâtiment spécifique pour l'enseignement élémentaire, les enfants de différentes classes étaient éduqués à la maison. Ils fréquentaient parfois de petites salles de classe peu adaptées à l'enseignement dans des bâtiments publics ou dans la maison du professeur (Figure I.1). Les enfants qui travaillaient pouvaient étudier parfois à la fin de la journée dans les écoles du soir (Forster, 2004).



Figure I. 1: Un tableau noir installés dans la chambre à coucher du maître d'école. Source : (Forster, 2004)

I.1.2.2 École du père Grégoire Girard

Une expérience remarquable est tentée par le père Grégoire Girard entre 1818 et 1823, celui-ci obtint une autorisation de la part de la ville de Fribourg pour la construction d'une école destinée à son enseignement dans la ville de Fribourg (Fontaine & Brühwiler, 2017). Il a réalisé ses propres plans sous forme d'un espace suffisamment grand pour que tous les élèves puissent s'asseoir devant le tableau, de plus, les rangées des tables et un espace circulation suffisant étaient prévus pour le déroulement des activités de l'enseignement (Figure I.2). Après cette première expérience, la création d'un espace pour l'éducation des enfants remonte à 1877, quand l'Europe a promulgué une loi interdisant le travail des enfants. L'espace scolaire de cette époque était caractérisé par une forme rectangulaire avec de grandes baies vitrées et des rangées de tables face au bureau du l'enseignement (Forster, 2004).

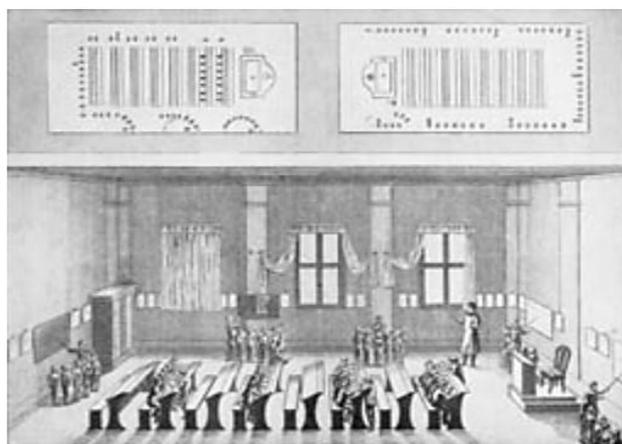


Figure I. 2 : lasse d'enseignement mutuel selon le Père Girard. Source : (Forster, 2004)

En 1832, l'architecte Bouillon présenta son travail pour la réalisation d'un bâtiment d'école primaire, ce fut le premier modèle du bâtiment scolaire. Les recommandations promulguées dans le cadre de 'la Charte de l'Éducation de l'Instruction Publique' édicté par la loi Gizotto du 28 juin 1833 étaient basées sur ce plan standard. Chaque commune était obligée de construire une 'maison d'école', cependant, ce furent généralement des bâtiments existants qui étaient utilisés. Les salles de classe étaient étroites, très peu éclairées et insalubres, pouvant parfois accueillir jusqu'à 50 élèves (Forster, 2004).

I.1.2.3 Création d'un langage architectural : le 'Heimatstil'

La naissance d'une architecture scolaire sous la responsabilité de l'État a commencé au XIXe siècle. Depuis 1907, les écoles ont commencé à être construites dans les villes et les villages. Un langage architectural a commencé à se créer à l'instar des temples, des églises, des prisons et des usines. Dans le même contexte, 'Heimatstil' un style helvétique a fait son apparition à la fin de XIXe siècle, il devint populaire et se répandit dans toute l'Europe (Delaune, 2003). Ce style est identifié par ses toits à forte pente, amples, compliqués, à ses cheminées, à ses petites tourelles et à ses clochetons. A l'intérieur du bâtiment, les salles de classe s'égrènent le long des corridors (Figure I.3). Sur les murs, on épingla des planches de morale ou d'histoire naturelle, des tableaux patriotiques et des cartes géographiques (Delaune, 2003; Forster, 2004).

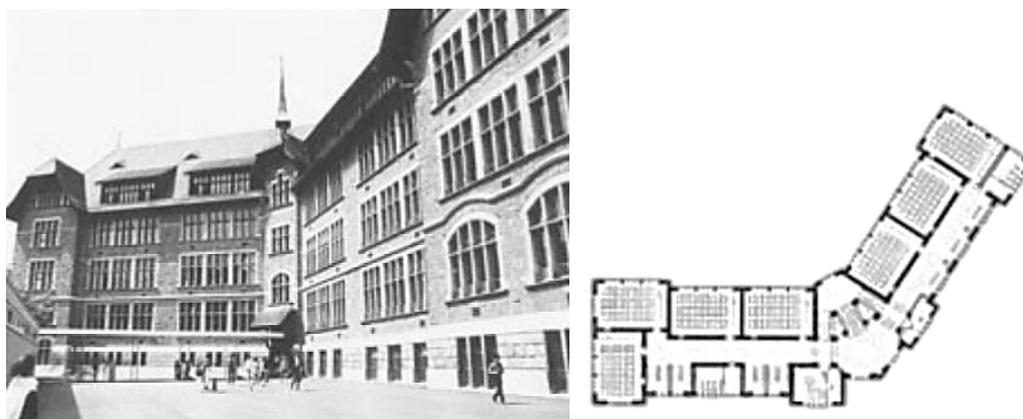


Figure I. 3: Collège de Vevey, arch. Ch. Günthert, 1909. Ci-contre plan des étages. Source : (Forster, 2004)

A cette époque en Europe, le style 'Queen Anne' est créé par l'architecte E.R. Robson, lequel adopta le modèle intérieur Prussien. Ce style a également connu un grand essor, il s'agissait d'un ensemble de salles de classe avec des grandes fenêtres groupées autour d'un hall central utilisé pour des cours communes et de rassemblements (Forster, 2004; Harwood, 2015).

Entre les deux guerres mondiales, l'architecture scolaire est devenue plus simple et plus fonctionnel, son objectif était de promouvoir l'éducation démocratique. Durant cette période, deux styles architecturaux ont coexistés ; il s'agissaient des écoles construites en longues barres et des écoles pavillonnaires (Châtelet & Le Cœur, 2004).

I.1.2.4 École en barre

Ce style a gagné en popularité au lendemain du Congrès International d'Architecture Moderne (CIAM), qui promut la simplicité des formes, la fonctionnalité, l'introduction de nouveaux matériaux et techniques de construction (industrialisation), et rejetta catégoriquement l'académisme et les constructions monumentales. L'architecte Fritz Schumachersur a conçu et construit l'école Meerweinstraße à Hambourg (Figure I.4) entre 1927 et 1930, c'était un modèle représentative de ce style (Châtelet & Le Cœur, 2004). Un couloir central et des salles de classe de chaque côté, constituaient la composante majeure du type de l'école-barre (Deleval, 2016).

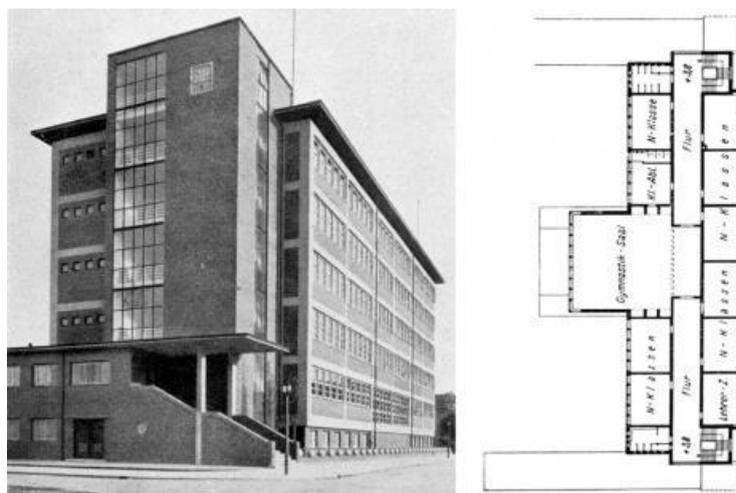


Figure I. 4 : École Meerweinstraße à Hambourg. 1927-1930. Source : (Châtelet & Le Cœur, 2004)

I.1.2.5 École pavillonnaire

Ce fut Tony Garnier (1869-1948), un architecte français qui a remporté le Grand Prix de Rome en 1899, qui était l'inventeur de l'école pavillonnaire. Ce fut dans le cadre de sa vision utopique où il imagina une future ville industrielle avec de petites écoles parsemées d'espaces verts. Cependant, la première école pavillonnaire a été construite à Bruderholz, Bâle, en 1939 (Deleval, 2016). Le but des petites écoles séparées était de recréer une atmosphère familiale propice au développement des enfants tout en offrant de bonnes conditions d'apprentissage et de sécurité. Au cours des années 1950, les écoles pavillonnaires, ou écoles avec murs, portes et classes ouvertes, étaient populaires. Les enfants pouvaient se rassembler dans des zones

adaptées à leur âge et pouvaient se récréer dans des préaux séparés, dallés à l'intérieur et gazonnés de l'extérieur (Saddok, 2015). L'école pavillonnaire de Suresnes (1933) est un exemple (Figure I.5).

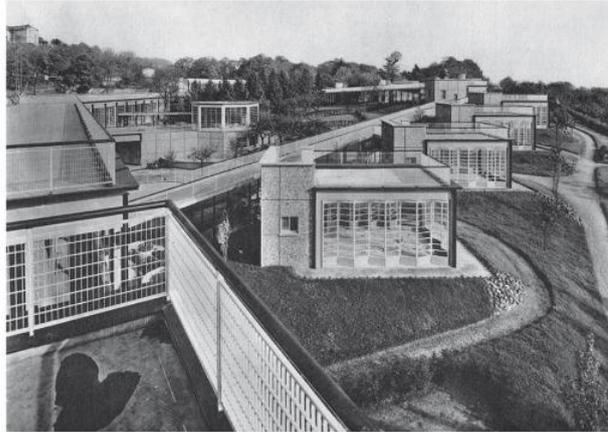


Figure I. 5 : Les classes de l'école pavillonnaire de Suresnes construite par Eugène Beaudouin et marcel Lods de 1931 à 1934. Source : (<https://books.openedition.org>, consulté le 17/05/2021)

I.1.2.6 École de plein air

Depuis le début du XXe siècle, les pays industrialisés ont ouvert des écoles de plein air aux enfants les plus fragiles, menacés de tuberculose ou souffrant de déficiences physiques et parfois mentales. Les enseignants et les médecins travaillaient en collaboration pour créer un environnement d'apprentissage stimulant et sain (Berger, 2004).

Au départ, l'école de plein air était réalisée sous forme d'une tente, cependant, dès les années 1920, elle devint une affaire d'architectes. Ce modèle se base sur l'idée de combiner l'air et la lumière pour améliorer l'épanouissement physique et intellectuel de l'enfant. L'école en plein air se caractérise par son plan flexible, à ce titre, il est recommandé de retirer les cloisons non porteuses et de créer des zones de travail communes. Il fallait aussi, inclure des espaces communs où les enfants de différents âges pouvaient travailler ensemble. De vastes salles de travail regroupées autour d'un hall central étaient également aménagées auxquelles les étudiants et les enseignants avaient accès, ainsi que des tables pour les travaux de groupe et des cloisons mobiles pour la flexibilité des espaces (Berger, 2004; Châtelet & Le Cœur, 2004; Forster, 2004). Certains projets célèbres comme celui de Jan Duiker à Amsterdam en 1930 représenté dans la (Figure I.6), celui de Richard Neutra à Los Angeles en 1925, celui de Beaudouin et Lods à Suresnes en 1935, illustrent ce type d'école.

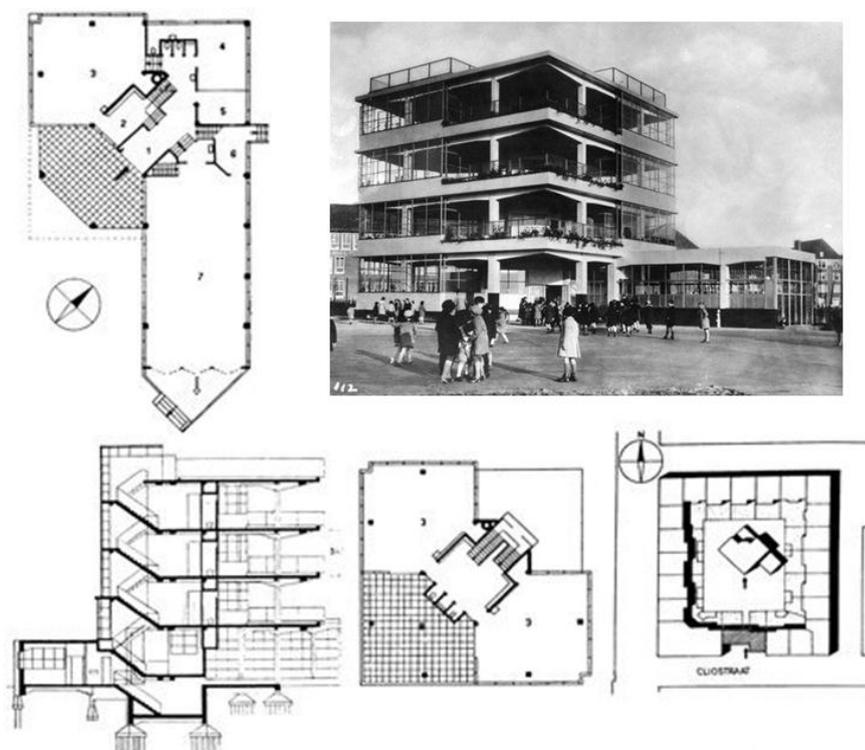


Figure I. 6 : École de plein air d'Amsterdam, par Jan Duiker et Bernard Bijvoet, 1927-1930. Source : (<http://www.architectureguide.nl>, consulté le 17/05/2021)

I.1.2.7 Standardisation de l'architecture scolaire

En raison des destructions massives survenues durant la Seconde Guerre mondiale et ses conséquences, notamment, le besoin de la restauration et la surpopulation des classes, des écoles froides et impersonnelles ont réapparues dès la fin de la guerre. Ainsi, entre 1966 et 1975, trois mille cinquante collèges ont été construits, en moyenne un par jour pendant une décennie. Pendant cette époque, une grande phase d'industrialisation de l'architecture scolaire est commencée. Les constructeurs devaient construire rapidement et de la manière la plus économique. Dans la foulée, l'architecture scolaire a été normalisée et standardisée: le module de base faisait un mètre soixante-quinze, le couloir faisait un module et la salle de classe faisait quatre modules sur cinq, la hauteur sous plafond mesurait trois mètres. Le rythme des fenêtres était régulier, et le même schéma s'appliquait à la salle de classe: l'estrade, les fenêtres à gauche et le couloir du milieu (Berger, 2004; Tebbouche, 2010).

I.1.2.8 École ouverte et le reclouonnement

D'après Deleval (2016), la pédagogie subit une transformation importante à la fin des années 1960. En effet, désormais, on accorde plus d'attention à la personnalité de l'enfant, et de nouveaux établissements ont été réalisés dès 1969 pour mettre en application ces nouvelles

orientations. Les enfants sont, alors, divisés en groupes d'âges et des capacités différents, et les enseignants travaillaient ensemble en équipe plutôt que seuls. En outre, il était recommandé de retirer les cloisons non porteuses afin de créer des espaces communs pour favoriser le contact entre les enfants et le travail collectif. En général, ces écoles comprenaient un espace central autour duquel se regroupaient les espaces de travail individuels ou collectifs. De plus, il existait de nombreux espaces au sein même des salles de classe pour permettre le déroulement de différentes activités, telles que la lecture, les jeux de mathématiques, etc. La zone de lecture ressemblait à un petit salon avec beaucoup de coussins. Les murs de la classe étaient recouverts de dessins d'enfants. Ce style d'école était appelé école 'à plan variable' ou 'ouverte' son but était que l'enfant se sente chez lui.

En 1970, conformément aux nouveaux programmes de construction d'écoles et aux objectifs de rénovation pédagogique, l'architecture scolaire a été intégrée aux espaces de vie en créant une connexion entre les mondes extérieur et intérieur. Les autorités politiques ayant imposé que l'école soit ouverte, de nouveaux espaces ont fait leur apparition au sein de l'école, tels que la bibliothèque, les ateliers et les salles de repos, les espaces de jeux et de sport. Ces innovations architecturales, en revanche, provoquèrent une résistance de la part des enseignants et des parents. Ce qui eut pour effet le retour au reclouisonnement des espaces dans l'école dans les années 80.

I.1.2.9 Espaces modulables

L'idée de la flexibilité des espaces revient aujourd'hui, mais dans un tout autre contexte. Les mentalités ont changé et les nouvelles technologies bouleversent l'enseignement. Les nouvelles pratiques pédagogiques nécessitent une grande souplesse dans les espaces pour pouvoir passer d'un travail de groupe à un travail individuel (Saddok, 2015). Prenons l'exemple d'un enfant qui fait seul des recherches, puis qui en discute avec un groupe de travail, puis, pour finir, présente ses informations à l'ensemble de la classe. Il faut donc, dans cet exemple, trois types d'espaces.

L'architecture scolaire de nos jours doit donc prévoir une multitude d'espaces différents ou des espaces modulables. De ce point de vue, les plans proposés sont flexibles et présentent en général un espace de ressources au centre, autour duquel sont répartis des espaces de travail individuel et les espaces modulables pour le travail de groupe. En conséquence, la conception des lieux d'enseignement d'aujourd'hui doit offrir une variété d'espaces adaptables et modifiables.

I.1.3 Évolution du système éducatif en Algérie

L'histoire de l'architecture scolaire en Algérie est de nature complexe, et témoigne de la coexistence parfois conflictuelle entre plusieurs systèmes éducatifs. Trois périodes fondamentales ayant marqué l'évolution de l'école algérienne peuvent être distinguées.

I.1.3.1 Période de la Régence (antérieure à 1830)

Comme dans tous les pays musulmans, l'enseignement en Algérie avant 1830, était dispensé dans les écoles coraniques. Peu d'archives existent sur le fonctionnement de ces écoles coraniques, mais en général, l'enseignement était réservé aux seuls garçons, il était basé essentiellement sur la mémorisation et la récitation du Coran et il se poursuivait jusqu'à l'âge de seize ans. Sadeg (2014) estime à environ 2000 le nombre d'écoles coraniques dans toute la Régence de l'Empire ottoman. Durant cette période, l'instruction religieuse était organisée comme suit (Ferrandez, 2017; Tebbouche, 2010):

- L'enseignement primaire se déroulait dans les écoles coraniques appelées Msids, ces petites écoles étaient dirigées par Talebs ou Moueddebs, l'enseignement consistait à apprendre à lire et à écrire les lettres de l'alphabet et quelques textes du Coran sur des planchettes en bois avec une encre facilement lavable.
- L'enseignement secondaire s'effectuait dans les Kuttab. Il était le fait des confréries religieuses ou zaouïas. Les zaouïas, très répandues dans les campagnes étaient gérés par une communauté religieuse structurée qui porte le même nom que le saint homme qui l'a fondée. L'enseignement s'effectuait dans une école généralement construite non loin de la tombe du saint homme ou parfois dans la mosquée affiliée au complexe religieux de la zaouïa. Ces écoles enseignaient le saint Coran et ses commentaires ainsi que la grammaire et l'arithmétique.
- L'enseignement supérieur s'effectuait au niveau des Médersas ou Madrassas, les élèves recevaient alors un niveau d'instruction approfondi en sciences islamiques en plus d'autres sciences tels que la langue, la littérature et grammaire arabe, la jurisprudence et la théologie, quelquefois l'arithmétique, la géométrie, l'astronomie, etc.

I.1.3.2 Période coloniale (de 1830 à 1962)

Pendant la période coloniale, deux systèmes éducatifs distincts ont été mis en place, l'un pour les Français et l'autre pour la population autochtone (musulmane). Voici les principales étapes

de l'évolution du système d'enseignement durant cette époque (Tebbouche, 2010; Saddok, 2016) :

- Le système institutionnalisé de l'éducation des musulmans est mis en place en 1883, cependant, la population locale autochtone a exprimé une forte opposition à l'école publique française.
- Quelques années plus tard, la France a créé des 'écoles indigènes' avec des enseignants, des programmes et des diplômes spécifiques, qui étaient distincts de l'enseignement général dispensé aux enfants européens.
- Entre 1931 et 1939, l'association Oulémas créa 260 Médersas libres dans le but principal d'aider à l'éducation de jeunes algériens non-inscrits dans une école publique française. Au début de la lutte de libération nationale, seuls 10% des enfants algériens étaient instruits, tandis que plus de 97% des enfants européens étaient scolarisés.

I.1.3.3 Période postcoloniale (après 1962)

L'Algérie indépendante hérite d'un taux très élevé d'analphabétisme, estimé en 1954 à 86,3% de la population totale (Sadeg, 2014). L'éducation demeure un privilège ; plus de 80% des enfants scolarisables (6 à 15 ans) ne fréquentent pas l'école avant 1962. A cet effet, dès l'indépendance en 1962, des réformes sont mises en place par l'État algérien.

- De 1962 à 1976, est considérée comme une période préparatoire, assurant le démarrage de l'école algérienne. La généralisation de l'éducation par la création d'un système éducatif algérien, ainsi que l'adaptation des contenus et des institutions héritées de l'époque coloniale, font partie des priorités de cette période.
- De 1976 à 2008, cette période a commencé avec la promulgation, le 16 avril 1976, de l'ordonnance 76-35, qui a entraîné des changements importants dans l'organisation de l'enseignement. Ce texte impose une éducation fondamentale obligatoire et gratuite. De 1980 à 1989 un cadre institutionnel national de formation a été mis en place. C'était la période d'extension de la capacité pédagogique et diversification des modes de formation. De 1990 à 2008, un ensemble de réformes a été mis en œuvre dans le but de fournir les ressources nécessaires au système éducatif national. Ceci afin de s'adapter aux changements institutionnels, économiques et sociaux qui se sont produits dans le pays (Saddok, 2016).
- De 2008 à nos jours, cette période fait suite à la mise en œuvre d'une nouvelle stratégie pédagogique visant à améliorer les conditions d'accueil des élèves et les performances

scolaires. Cela peut être traduit par : l'expansion du réseau éducatif, avec la réception en 2009 de 15 000 salles de classe, environ 1 100 nouveaux collèges, 500 lycées et pas moins de 500 installations sportives auxquels s'ajoute la construction d'infrastructures de soutien, dont 1 800 cantines scolaires. Il faut signaler aussi que l'effort le plus remarquable en matière d'éducation est celui de la démocratisation de l'enseignement. Au plan des infrastructures, le nombre d'écoles primaires est passé de 17 357 au cours de l'année scolaire 2006-2007 à 17 680 en 2009-2010, durant la même période, le nombre de collèges d'enseignement (CEM) est passé de 4 104 à 4 784 et le nombre de lycées de 1 116 à 1 745 (Sadeg, 2014). Cependant, durant cette période d'extension du système scolaire, l'aspect quantitatif l'a emporté sur l'aspect qualitatif.

I.1.4 Typologies du bâtiment scolaire

En architecture, le terme 'typologie' fait référence à une classification de types spatiaux, de modèles, de prototypes ou de formes architecturales primaires (Franck & Schneekloth, 1994; Saddok, 2015). L'étude des caractéristiques spécifiques des différents types de bâtiments et leur classification selon divers critères (dimensions, fonctions, distribution, construction, esthétique, etc.) est appelée analyse typologique.

La diversité de bâtiments scolaires conçus au cours des deux dernières décennies démontre l'utilisation de modèles morphologiques et spatiaux, dont certains suivent des types traditionnels et d'autres en diffèrent. La disposition spatiale du bâtiment scolaire a généralement une forte influence par un ensemble de caractéristiques tels que le niveau d'enseignement, le nombre d'élèves, la philosophie pédagogique de l'école, les conditions climatiques et l'emplacement géographique (Rigolon, 2010).

I.1.4.1 Typologies du bâtiment scolaire en Europe

D'après Rigolon (2010) et Saddok (2015), la disposition spatiale du bâtiment scolaire fait ressortir quatre catégories ou types de bâtiments (Figure I.7) :

- Type Cour : les bâtiments sont disposés autour d'une cour centrale. La majorité des blocs qui composent ce type suivent le tracé linéaire, avec un couloir menant aux salles de classe. Selon cette catégorie, trois sous-types peuvent être identifiés: fermés, ouverts en L ou U, ou bien une combinaison entre les deux.

- Type Bloc : il se présente sous forme d'un bloc compact caractérisé généralement par un seul grand espace commun polyvalent qui se connecte directement aux principaux espaces d'apprentissage (salles de classe, ateliers, laboratoires).
- Type Grappe : il se caractérise par sa fragmentation en différents volumes qui représentent des unités pédagogiques indépendantes. Chaque unité est destinée pour à un type particulier d'élève.
- Type ville : il est défini par un grand nombre d'espaces et de fonctions, sa complexité lui doit la métaphore de la ville. L'espace public est entouré de salles communes telles que la bibliothèque et l'auditorium, à partir desquelles les rues mènent à des espaces de plus en plus privés selon une structure hiérarchique.

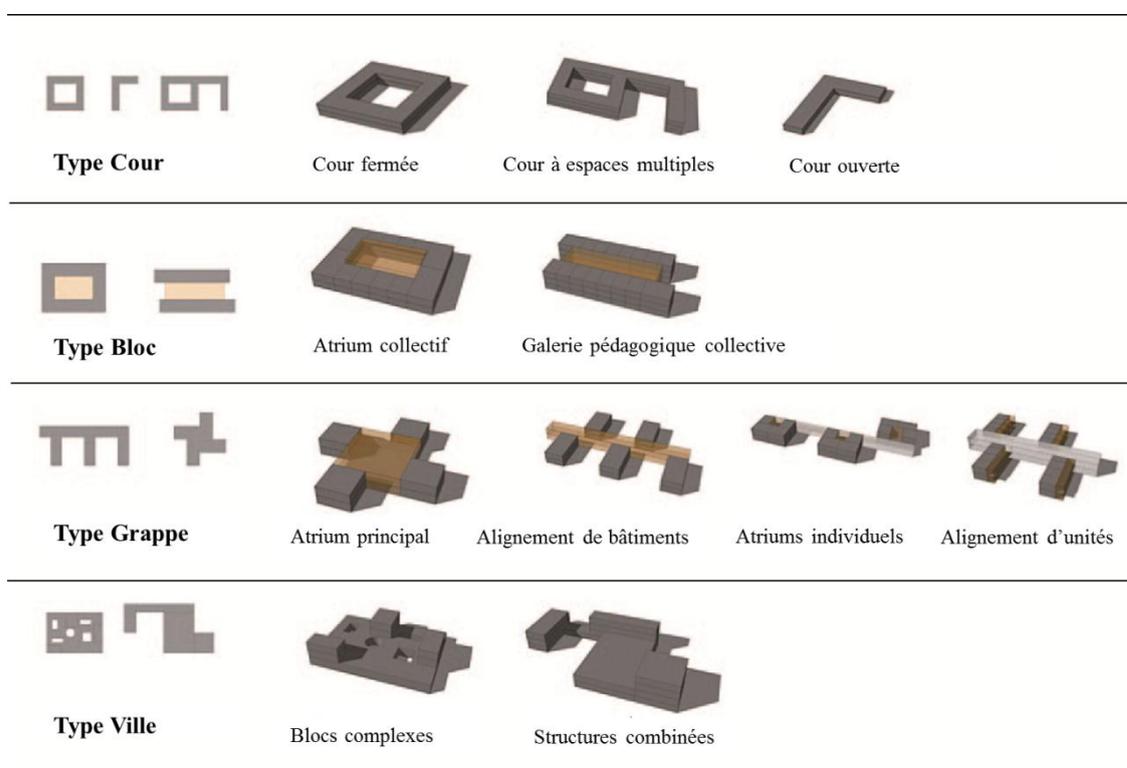


Figure I. 7 : Typologies des bâtiments scolaires. Source : (Rigolon, 2010)

I.1.4.2 Typologies du bâtiment scolaire en Algérie

Selon (Ivanova, 2019; Rigolon, 2010; Saddok, 2015) la conception des bâtiments scolaires en Algérie relève de trois catégories fondamentales :

- Type de plan à coursive : c'est la configuration la plus courante dans les bâtiments éducatifs en Algérie. Ce type se caractérise par une longue galerie distribuant selon un seul côté des salles de classe (distribution unilatérale). Celles-ci sont de forme généralement rectangulaire et bénéficient d'une double orientation.

- Type à corridor central : cette configuration présente un couloir linéaire central distribuant de part et d'autre les salles de classe (distribution bilatérale). Cette distribution est plus flexible et facilite la communication entre les différents lieux. Par contre les fenêtres des salles de classe sont ouvertes sur un seul côté.
 - Type mixte : il combine entre les deux types à coursive et à corridor central.
- L'assemblage des blocs pédagogiques de ces types fondamentaux se retrouve sous différentes formes en L, U, H ou fermé. La Figure I.8 montre l'ensemble des types expliqués précédemment et leur organisation selon un tableau typologique.

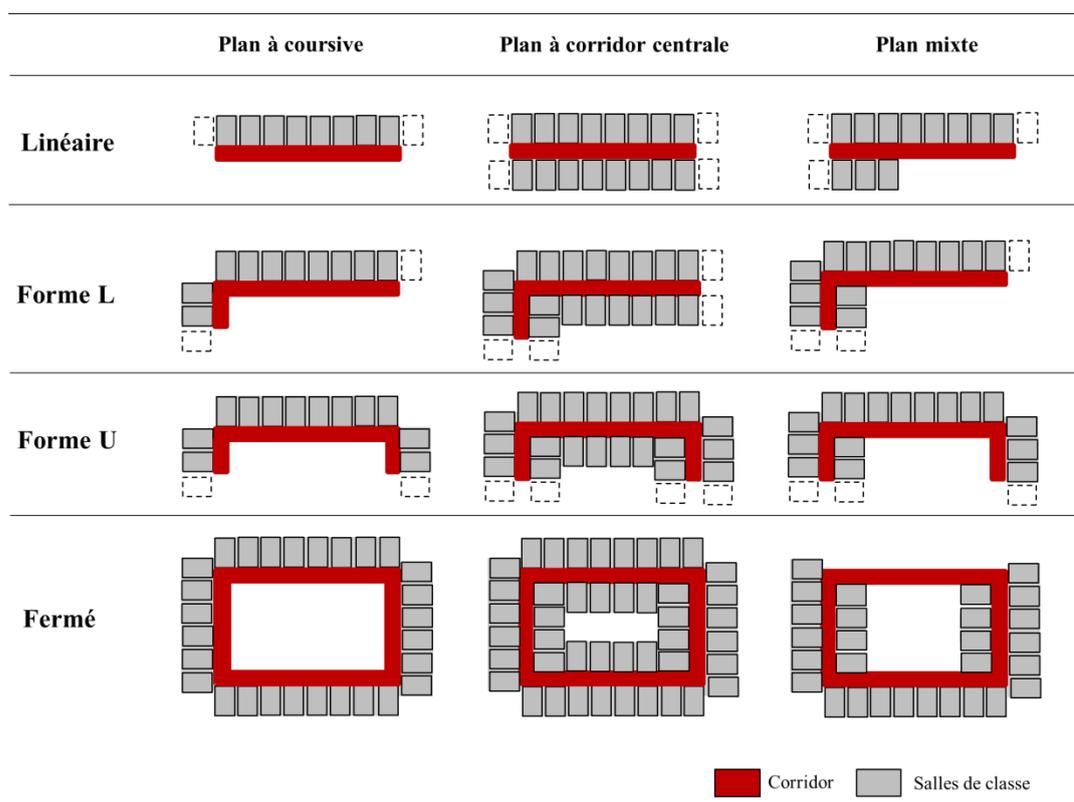


Figure I. 8 : Typologie des bâtiments scolaires en Algérie. Source : (Ivanova, 2019) adaptée par l'auteur.

I.1.5 Prescriptions relatives à la conception des salles de classe

Il existe de nombreux guides de construction des bâtiments scolaires, les règles générales de la conception et de l'aménagement des salles de classe se résument comme suit (Amar & Bendimerad, 2019; Classroom Design Standards, 2010; Ministère de l'éducation nationale, 1971, 1982; Neufert, 1996; Saddok, 2015) :

- Emplacement : l'environnement d'apprentissage doit être situé dans un bâtiment facile d'accès pour les étudiants et les équipements, isolé des lieux de rassemblement bruyants, et

être concentré sur les étages inférieurs des bâtiments afin de faciliter l'accès des étudiants; handicapés et services de soutien.

- Formes et dimensions : le plan carré ou proche du carré est la forme la plus rationnelle pour une salle de classe. Cette disposition géométrique présente quelques avantages non négligeables. Le rapport largeur/profondeur (1/1) assure aux élèves le meilleur angle de vue frontal et permet également une plus grande flexibilité dans l'organisation de l'espace et la distribution des meubles. Si la salle est rectangulaire, le rapport largeur/profondeur ne doit pas dépasser 3: 2. La hauteur sous plafond est en minimum 3m et ne dépassera en aucun cas 3.50m.

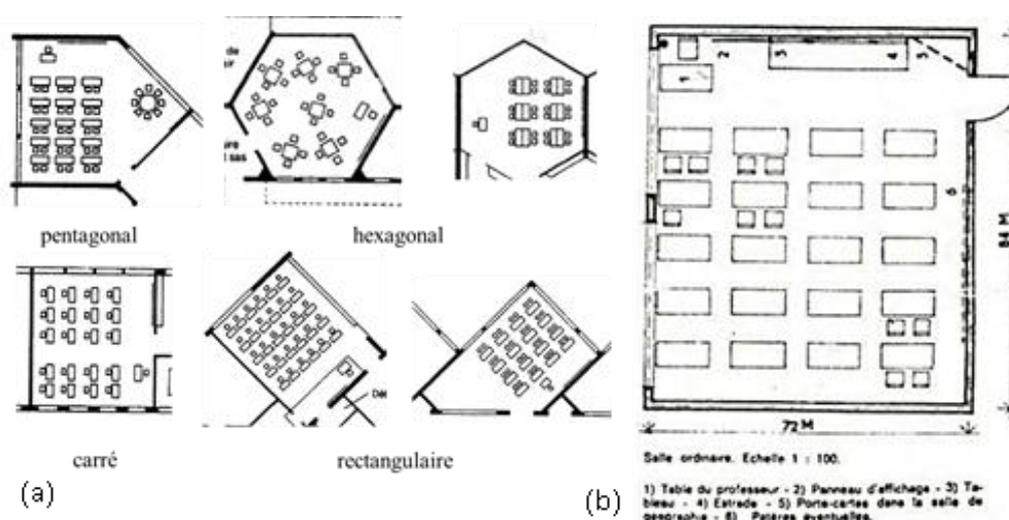


Figure I. 9 : (a) Formes des salles de classe, (b) Dimensions recommandées pour une salle de classe ordinaire. Source : (Neufert, 1996; Saddok, 2015).

- Surface : la surface de la salle de classe varie de 50 à 60m², les petites classes de 45 à 50m², les grandes classes d'environ 85m². Une salle de grande dimension (entre 100 et 200m²), servant éventuellement de salle de projection ou de salle de conférences (Neufert, 1996). Selon (Ministère de l'éducation nationale, 1971, 1982) la surface modulaire de la salle de classe est estimée entre 60m² à 62m² avec une surface utile correspondante qui ne doit pas être inférieure à 56m² et la surface utile par élève est de : 1,40 m à 1,50 m (avec une capacité de 40 élèves/classe).
- Meubles : les meubles de la salle de classe devraient être mobiles et devraient avoir une table à un ou deux occupants, la distance entre la 1^{ère} table et le tableau est de 2m au minimum, et entre la dernière table et le tableau, elle sera de 9 m au maximal. Les chaises doivent être mobiles et reconfigurables, la distance entre les rangées est égale à 0,9 m.

- Éclairage naturel : l'éclairage naturel latéral ou zénithal est recommandé en complément de l'éclairage artificiel indirect et il devrait être favorisé dans les salles de classe par rapport à d'autres types d'espaces.
- Éclairage artificiel : l'éclairage blanc naturel de LED (3500k) est conseillé. Tout l'éclairage artificiel doit être conçu pour maximiser la visibilité des projecteurs.
- Acoustique : le son indésirable provenant des espaces adjacents ne doit pas pénétrer dans une salle de classe afin de préserver un contrôle audible pour un enseignement efficace. Le son doit se répercuter correctement dans la pièce pour assurer que tous les élèves puissent entendre l'instructeur, les médias audiovisuels et les autres étudiants.
- Climat : toutes les pièces doivent être climatisées, la chaleur et la climatisation, doivent être uniformément dispensés dans toute la pièce.

I.2 Performance énergétique du bâtiment scolaire

Il est reconnu que les décisions prises lors des premières étapes de la conception architecturale ont un impact important sur la performance énergétique d'un bâtiment. Selon Ruano (2007), un bon choix de forme et d'orientation pour un bâtiment peut entraîner une réduction jusqu'à 40 % de la consommation d'énergie. Olgyay (1963), ainsi que Martin et March (1966), ont été parmi les premiers chercheurs à s'intéresser à la relation entre forme architecturale et la consommation énergétique (Iturra, 2011). L'amélioration de l'efficacité énergétique dans le secteur des bâtiments constitue donc un axe de progrès prioritaire. Elle est notamment soutenue par les politiques publiques.

Les bâtiments scolaires représentent une part importante de la consommation totale d'énergie (Pereira et al., 2014), en conséquence, ils représentent une opportunité importante vers l'efficacité énergétique.

I.2.1 Concept de la performance et de l'efficacité énergétique du bâtiment

La performance en général est un concept important dans la société d'aujourd'hui. Dans le domaine de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction, ce concept est de plus en plus utilisé de telle sorte que l'efficacité énergétique des bâtiments, la qualité de l'environnement intérieur, le confort thermique et l'éclairage sont devenus des dimensions incontournables pour la production du cadre bâti (de Wilde, 2019).

En physique, l'efficacité énergétique désigne le rapport entre l'énergie utile produite par un système et l'énergie totale consommée pour le faire fonctionner. Cette notion est souvent interprétée dans un sens plus large pour désigner les technologies et pratiques permettant de diminuer la consommation d'énergie tout en maintenant un niveau de performance finale équivalent.

Le concept de la performance a commencé à être utilisé en 1970 (Gibson, 1982). Le terme performance au sens large est lié aux bâtiments répondant aux exigences des utilisateurs en fournissant un environnement intérieur propice, confortable, sain et sécurisé pour mener à bien différentes activités, y compris le travail, les études, les loisirs, la vie de famille et les interactions sociales (Bakens et al., 2005).

La définition des performances a été divisée en deux parties: l'intégrité de l'enceinte du bâtiment qui comprend la protection des propriétés visuelles, mécaniques et physiques des bâtiments contre la dégradation de l'environnement telle que la température, le rayonnement et les catastrophes naturelles. La seconde partie est en rapport avec les exigences d'occupation intérieure et comprend les paramètres élémentaires du confort: confort thermique, acoustique, visuel, aérien et spatial nécessaires pour mener des activités dans un environnement sain et sécurisé (Hartkopf et al., 1986).

Le progrès technologique et les changements dans l'environnement économique ont accru les attentes, et les exigences des occupants des bâtiments vis-à-vis du confort et du bien être. Le concept de la durabilité a gagné en importance, ce qui a conduit à une extension des aspects généralement pris en compte dans l'évaluation des performances des bâtiments. De fait, le concept de performance du bâtiment a acquis une perspective plus large et des termes tels que 'performance totale du bâtiment', 'performance sur toute la durée de vie', 'performance globale' ou 'performance intégrée du bâtiment' ont commencé à être utilisés (Rudbeck, 2002).

Parmi les nombreux concepts de bâtiments performants, le bâtiment 'à énergie zéro' ou encore 'à énergie positive' sont parmi les plus récents. En outre, les objectifs de performance des bâtiments sont souvent définis dans le cadre de certifications, précisant une méthode d'évaluation de leur niveau de réalisation. Leurs appellations diffèrent, chacun se concentrant sur une caractéristique clé de la construction (Disch, 2008; Maugard et al., 2005). Les besoins énergétiques des 'bâtiments basse consommation' sont inférieurs à ceux des bâtiments classiques. Ce premier niveau de performance peut être atteint en améliorant l'isolation, en abaissant les ponts thermiques et en augmentant les entrées passives.

Le bâtiment ‘passif’ est un autre concept de bâtiment qui consomme très peu d'énergie et ne nécessite pas de systèmes de chauffage ou de refroidissement actifs : les sources d'énergie solaires et internes passives, ainsi que les systèmes de ventilation, suffisent à fournir un environnement intérieur confortable tout au long de l'année. Ce concept inclut également une réduction des besoins spécifiques en électricité, ainsi que la possibilité de produire de l'électricité à partir de sources d'énergie renouvelables (Thiers, 2008).

Le bâtiment ‘zéro énergie’ ou ‘zéro net’ est un bâtiment qui combine de faibles besoins énergétiques avec les capacités locales de production d'énergie. Si elle est mesurée sur une année, sa production d'énergie est égale à sa consommation d'énergie. Par conséquent, le bilan énergétique annuel net est nul (Bernier, 2006).

Lorsque l'approvisionnement énergétique d'un bâtiment est indépendant de toute source extérieure, il est dit ‘autonome’. Ainsi, la totalité de l'énergie consommée par le bâtiment est générée sur place à partir de ressources locales. En pratique, le bilan énergétique net de cette structure est nul à ce moment. Ce type de structure profite des avantages apportés par les réseaux de distribution (filage, sécurisation de la distribution), nécessitant l'utilisation de dispositifs de stockage d'énergie (batteries, inertie thermique...). De plus, ce type de bâtiment est idéal pour les emplacements isolés puisqu'il élimine les coûts de raccordement à plusieurs réseaux (Thiers, 2008).

I.2.2 Stratégies pour l'amélioration de la performance énergétique d'un bâtiment

Parmi les solutions d'amélioration de l'efficacité énergétique, il est d'usage de distinguer les solutions dites ‘passives’ qui consistent à réduire la consommation d'énergie des équipements et des matériaux grâce à une meilleure performance intrinsèque et les solutions dites ‘actives’ visant à optimiser les flux et les ressources. Les solutions passives consistent à accroître les qualités intrinsèques d'un bâtiment afin d'optimiser l'utilisation des énergies qui lui sont fournies. Considérant que la consommation énergétique d'un bâtiment est conditionnée par les facteurs climatiques, les facteurs techniques (performance du fonctionnement énergétique de l'enveloppe et des systèmes de conditionnement), et le comportement de l'occupant, de ce point de vue, la conception architecturale peut jouer un rôle déterminant pour réduire la consommation énergétique globale du bâtiment. Ainsi, De nombreux paramètres peuvent être pris en compte lors de la conception d'un bâtiment, par exemple :

- Son orientation et sa capacité à profiter de l'énergie lumineuse, à capter et à se protéger de l'énergie solaire (principes bioclimatiques, matériaux de surface) ;
- Une isolation thermique renforcée, par exemple grâce à des faux plafonds empêchant le recours à l'inertie thermique, des matériaux comme la laine minérale ou le chanvre, des doubles vitrages à isolation renforcée. L'isolation thermique par l'extérieur (par exemple à l'aide de briques de polystyrène expansé) permet de diminuer les pertes thermiques de la paroi jusqu'à 80% ;
- Une meilleure étanchéité générale du bâti à l'air (air parasite notamment dû aux liaisons façades-planchers surtout entre les façades et les menuiseries ou aux passages des équipements électriques).

I.2.3 Performance énergétique du bâtiment scolaire

Après la crise pétrolière des années 70, la réduction de la consommation d'énergie a été une priorité, non seulement pour des raisons économiques, mais aussi pour des raisons environnementales. Les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz), sont de l'énergie produite par la combustion du charbon, du pétrole ou du gaz naturel. Les énergies fossiles représentent aujourd'hui plus des trois quarts de la consommation mondiale d'énergie primaire, dans les transports, l'industrie et l'habitat. Elles sont également largement majoritaires (plus des deux tiers) dans la production de l'électricité, malgré la progression continue de la part des énergies renouvelables. Leurs réserves, même si elles sont encore vastes, ne sont pas inépuisables, contrairement aux énergies renouvelables. Les chercheurs ont estimé que les réserves d'énergie nous permettront de répondre à la consommation actuelle pendant 230 ans supplémentaires pour le carbone, 70 ans pour le gaz, 50 ans pour l'uranium et 40 ans pour le pétrole (De Herde & Liébard, 2005).

Tous les domaines d'activité ne consomment pas la même quantité d'énergie, ni les mêmes énergies. À l'échelle mondiale, les secteurs tertiaire et résidentiel représentent 30 à 40 % de la consommation globale d'énergie (Thiers, 2008). Ce sont les plus gros consommateurs et leur énergie préférée est l'électricité, à près de 37 %. La facture énergétique du secteur tertiaire prend plus d'importance dans les pays développés. Par exemple, dans l'Amérique du Nord, la demande énergétique du secteur tertiaire est égale à celle du secteur résidentiel. De son côté, l'Europe enregistre un taux de 25 %, les pays en voie de développement environ 13 %, alors

que le secteur tertiaire au Moyen-Orient et en Afrique du Nord est 25 % plus élevé que le secteur résidentiel (Seoud, 2012).

De ce fait, le bâtiment tertiaire de chaque pays a une consommation énergétique différente en fonction de son niveau de développement, de son climat, et des pratiques et modalités de conception et de réalisation en vigueur. Mais, quelles que soient les raisons qui ont entraîné des excès dans la facture énergétique, tous les pays ont pris des mesures drastiques pour réduire la consommation des énergies fossiles et donc leur impact environnemental (Zekraoui, 2017).

Dans le cas des écoles, l'enjeu est de conserver le confort sans augmenter la consommation énergétique (Iturra, 2011). L'analyse des données de consommation d'énergie pour les écoles de la province du Québec montre 38% des dépenses énergétiques sont liées au chauffage 9% à la climatisation et 14% à l'éclairage artificiel (Iturra, 2011).

Hong et al. (2013) ont examiné la consommation d'énergie dans 7 731 écoles primaires et secondaires en Angleterre, ce qui représente respectivement 39 % et 31 % du nombre total d'écoles primaires et secondaires du pays. L'intensité d'énergie utilisée EUI moyenne pour les écoles primaires et secondaires était de 166 kWh/m²/an et 172 kWh/m²/an, respectivement, selon les résultats de l'enquête. Après une analyse fine des données, le nombre d'étudiants et la densité du bâtiment ont eu le plus grand impact sur la consommation d'énergie de chauffage et d'électricité, respectivement. En analysant la consommation énergétique des bâtiments scolaires selon les différentes zones climatiques de l'Iran, Zomorodian & Nasrollahi (2013) ont constaté que la dépense énergétique des écoles situées dans la zone à climat chaud et aride représentait 41.91% de la consommation totale des établissements scolaires du pays. En outre, plusieurs recherches ont porté sur la consommation d'énergie dans les bâtiments scolaires à l'aide de statistiques descriptives. Leurs résultats soutiennent une tendance générale dans la littérature qui suggère que les écoles plus récentes utilisent plus d'énergie que les plus anciennes (Ouf & Issa, 2017).

I.2.4 Consommation énergétique du bâtiment scolaire en Algérie

La politique économique de l'Algérie est basée sur les ressources fossiles. Le secteur de l'énergie assure les deux fonctions économiques les plus importantes du pays ; il est nécessaire de fournir les équipements énergétiques socio-économiques nécessaires à son fonctionnement, ainsi que d'assurer son financement par l'exportation des produits pétroliers et gaziers (Saddok, 2015).

La consommation finale est passée de 48.1 M Tep en 2018 à 50.4 M Tep en 2019, reflétant une augmentation de 2.2 M Tep représentant +4.6% de la consommation, en raison principalement du gaz naturel +6.1%, du GPL (les Gaz de Pétrole Liquéfiés) +9.6%, des produits pétroliers +4.1%, et électricité +2.7% (MEM, 2019).

La répartition de la consommation d'énergie par produit illustrée dans la Figure I.10 montre l'importance de la part du gaz naturel 34 %, suivi par les produits pétroliers 32 % et l'électricité 28 %.

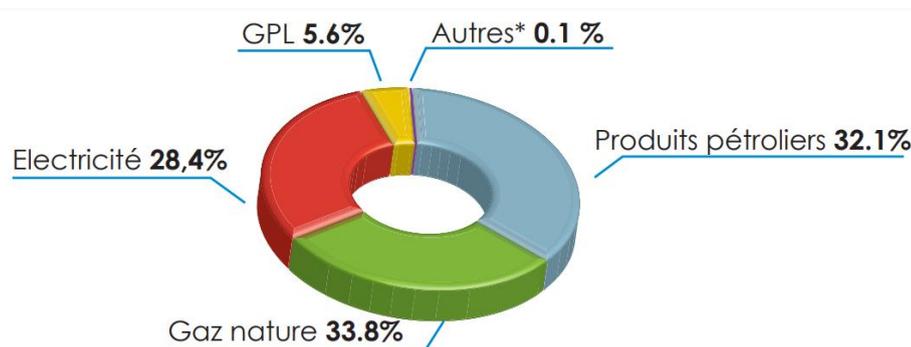


Figure I. 10 : La consommation finale d'énergie en Algérie par produit. Source : (MEM, 2019).

Le bilan national de l'énergie pour l'année 2019 présente la répartition de la consommation d'énergie par secteur d'activité. Le secteur des ménages et autres représente 46.7% y compris le secteur résidentiel et agricole, suivi par le transport 30.6%, et enfin le secteur de l'industrie et du bâtiment est les travaux publics avec une part de 22.7%, comme le montre la figure I.11.

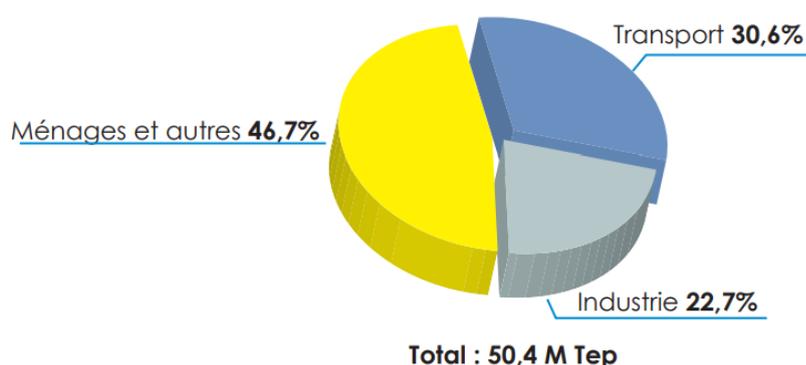


Figure I. 11 : La consommation finale d'énergie en Algérie par secteur. Source : (MEM, 2019).

D'après (Saddok, 2015), le secteur de l'éducation algérien a consommé environ 8% de l'énergie totale utilisée par le secteur tertiaire en 2010. En effet, le besoin pressant de répondre à une demande d'infrastructures toujours croissante a occulté les exigences de qualité. De ce fait, la

performance énergétique et environnementale des infrastructures éducatives est importante. Pour ce faire, les bâtiments scolaires doivent répondre à un ensemble d'exigences de différentes natures: confort hygrothermique, éclairage, confort acoustique, pureté de l'air, accessibilité, sécurité, etc.

L'énergie fossile est principalement utilisée dans les bâtiments scolaires pour le chauffage, le refroidissement et l'éclairage. Le chauffage est plus utilisé pour maintenir une température intérieure confortable, le chauffage central par circulation d'eau chaude est le procédé le plus utilisé dans les bâtiments scolaires en Algérie. La consommation d'énergie pour le chauffage est plus importante dans les zones froides, par contre, la consommation énergétique pour le refroidissement est plus grande dans les zones chaudes. Les systèmes de rafraîchissement les plus répandus dans les écoles sont les systèmes décentralisés, cependant, ils sont pratiquement inexistantes dans les écoles algériennes, à l'exception des régions du sud. D'autre part, l'éclairage artificiel est assuré par des points lumineux répartis sur deux circuits, avec un éclairage de 120 lux aux tables d'élèves et 200 lux au tableau, il est destiné à un usage diurne supplémentaire en cas d'éclairage naturel insuffisant.

Conclusion

En conclusion, la littérature concernant les bâtiments scolaires a permis de comprendre l'évolution de la conception des écoles à travers l'histoire et la création d'un langage architectural spécifique pour les établissements scolaires dans le monde. Autrefois, l'école était une pratique qui n'avait pas d'espace dédié à cet effet, le savoir se transmettait via les différentes activités de la vie quotidienne, aujourd'hui, l'espace éducatif s'est développé et la pédagogie nécessite une grande flexibilité spatiale.

Les chiffres de la consommation énergétique montrent une demande irrationnelle d'énergie, ce qui a entraîné un gaspillage massif des ressources fossiles, notamment dans le secteur du bâtiment scolaire. Les constructions à faible performance énergétique combinées à une utilisation excessive de l'énergie ont entraîné des consommations importantes. Les conditions de confort dans les bâtiments scolaires en Algérie sont principalement basées sur l'utilisation de l'énergie fossile pour assurer le chauffage, le refroidissement et l'éclairage. Par conséquent, il est essentiel de promouvoir une conception climatique appropriée permettant aux architectes de fournir des bâtiments scolaires performants.

*Chapitre II : Confort thermiques et
bâtiment scolaire en climat chaud et
sec*

Introduction

Il est relativement difficile de réaliser les conditions du confort thermique à l'intérieur des bâtiments en raison de la complexité des facteurs qui contribuent à déterminer si les conditions en question permettent aux personnes de ressentir un inconfort ou non. À ce titre, il est généralement admis que les facteurs affectant le confort thermique à l'intérieur des bâtiments peuvent être regroupés en deux groupes : les facteurs humains et les facteurs environnementaux. Ces derniers comprennent les températures de l'air, la vitesse de l'air, la température radiante moyenne et l'humidité relative, tandis que les facteurs humains comprennent la valeur isolante des vêtements (Clo) et le taux métabolique (Met) qui dépend du niveau d'activité.

De tous les facteurs environnementaux, la température de l'air est l'indicateur de confort thermique le plus couramment utilisé et est considérée comme le facteur le plus important déterminant le stress thermique. La température radiante moyenne, déterminée par la température des surfaces environnantes, est également un facteur important contribuant au confort thermique. De même, l'humidité relative est un autre facteur affectant les conditions de confort thermique. Des niveaux élevés d'humidité à l'intérieur des bâtiments atténuent l'évaporation de la sueur à la surface de la peau qui constitue le principal moyen par lequel le corps humain se débarrasse de l'excès de sa chaleur. Dans les climats chauds, cela peut avoir un effet significatif sur le confort thermique. Dans des circonstances normales, l'humidité relative devrait se situer entre 40 et 70 %. Un autre facteur affectant le confort thermique est le mouvement de l'air qui contribue à accélérer la capacité d'évaporation de l'air et par conséquent l'efficacité de la transpiration.

Ce chapitre vise en premier lieu à comprendre la relation homme-climat-bâtiment. Pour ce faire, il commence par identifier le climat et ses éléments, pour ensuite se focaliser sur la classification des zones climatiques dans le monde. Le climat chaud et sec est présenté en détail et un aperçu sur le climat chaud et sec en Algérie est fourni. Enfin, cette section est finalisée par une énumération des stratégies et principes de conception adaptés au climat chaud et sec. La deuxième partie du chapitre est consacrée au confort thermique. Les exigences humaines concernant les conditions de climat intérieur sont clarifiées, le confort thermique est défini de même que ses indices avant de passer au mécanisme d'ajustement du corps humain avec le climat intérieur. Finalement, les normes relatives à l'évaluation du confort thermique sont présentées, ainsi que l'importance du confort thermique et ses exigences relativement aux espaces scolaires notamment les salles de classes.

II.1 Adaptabilité du bâtiment au contexte chaud et sec

L'homme depuis son existence sur Terre a toujours été à la recherche d'un abri pour se protéger contre les conditions climatiques extérieures. Plus tard, son besoin s'est développé et l'abri primitif devait aussi garantir un certain niveau de confort. Aujourd'hui, il est généralement admis qu'une conception réussie est celle qui s'intègre à son environnement notamment en s'adaptant au climat dominant, tirant profit de ses avantages et se protégeant de ses inconvénients. De ce point de vue, il est indispensable d'avoir une parfaite connaissance des variations climatologiques du lieu afin de déterminer les caractéristiques de conception architecturales appropriés.

II.1.1 Climat

Le climat est un facteur important affectant l'homme dans son environnement naturel et bâti, et influençant la façon de concevoir son milieu intérieur et extérieur. Dans la littérature, il existe plusieurs définitions du climat. Ainsi, le dictionnaire Larousse (2019) définit le climat comme « Un ensemble de phénomènes météorologiques qui caractérisent l'état moyen de l'atmosphère à un endroit donné ». Pour sa part, Givoni (1978) a indiqué que le climat est un facteur complexe résultant de la combinaison de plusieurs éléments climatiques (température, humidité, mouvement atmosphérique, rayonnement solaire, précipitations, etc.) qui donnent une description statistique de l'état du système terre, l'influence de ces éléments varie d'un endroit à une autre. Pour Benhouhou (2012) le climat est l'ensemble des conditions atmosphériques régnant à un endroit et à un temps donné. Il peut aussi être défini comme une intégration temporelle de conditions atmosphériques qui caractérise chaque localisation géographique. Sur la base de toutes ces définitions, on retiendra que le climat correspond aux conditions météorologiques moyennes prévalant à long terme à un endroit spécifique. Pour sa part, l'architecture bioclimatique utilise le potentiel local et notamment les éléments du climat pour recréer le confort de chacun en s'adaptant aux variations climatologiques du lieu. Elle rétablit l'architecture dans son rapport à l'homme et au climat.

II.1.2 Classification du climat

Le climat qui prévaut dans le monde varie considérablement, allant des climats polaires extrêmes aux climats tropicaux. Ces derniers sont principalement affectés par l'énergie du soleil, qui réchauffe les masses terrestres et aquatiques. Au niveau régional, selon Gut & Ackerknecht (1993) le climat est affecté par l'altitude, la topographie, les modèles de courant des vents et des

océans, la relation entre les terres et les plans d'eau, et les formes de relief et les modèles de végétation.

Les classifications climatiques sont des méthodes fournies pour caractériser le climat régnant dans une région, en donnant un aperçu à l'échelle régionale de paramètres tels que la température et les précipitations. Plusieurs méthodes de classification du climat sont développées selon différents objectifs. Selon Leech (2013) certaines classifications utilisent des facteurs biophysiques tels que les précipitations, la température, et le type de végétation. D'autres sont basées sur le mouvement de masses d'air atmosphérique distinctes, ou même sur le rayonnement solaire incident. Indiquant qu'il existe des méthodes qui classent le climat par type de végétation et de sol régional. La section suivante donne un aperçu des méthodes les plus couramment utilisées.

II.1.2.1 Classification de Thornthwaite

Il s'agit d'un système de classification du climat, conçu par le climatologue américain Thornthwaite en 1931 et révisé en 1948. Cette classification est souvent citée comme un système de catégorisation du climat amélioré en raison de son approche rationnelle. Cependant, Feddema (2005) voit qu'il n'est que rarement employé, car il est trop compliqué à utiliser quotidiennement. Ce système divise le climat en plusieurs catégories basées sur la végétation, qui est déterminée par l'efficacité des précipitations P/E, où 'P' représente les précipitations mensuelles totales et 'E' correspond à l'évaporation mensuelle totale. Ce dernier indicateur se base sur la mesure de la 'capacité de séchage' de l'atmosphère, qui élimine l'eau de la surface terrestre par évaporation et transpiration végétale. Par conséquent, si E est supérieur à P, le climat est considéré comme aride.

II.1.2.2 Classification de Köppen-Geiger

Ce système de classification climatique est le plus couramment utilisé, le climatologue allemand Wladimir Köppen a publié la première classification des climats mondiaux en 1884. Après plusieurs révisions, le classement de Köppen s'est amélioré en 1918 et 1936. Plus tard, le climatologue allemand Rudolf Geiger (1954, 1961) a collaboré avec Köppen pour améliorer le système (Peel et al., 2007). En conséquence, la classification créée par les deux chercheurs est connue sous le nom de classification de Köppen-Geiger, et elle a été largement adoptée. Cette classification est basée sur des recherches empiriques et se fonde sur la répartition de la végétation dans le monde. Köppen a pensé que la végétation est la caractéristique la plus

représentative des précipitations et de la température. Il a distingué environ 29 types de climats, en utilisant les lettres A-E pour diviser le climat mondial en cinq grandes catégories (climat tropical, climat sec, climat tempéré chaud, climat tempéré froid et climat froid) afin de classer les climats en fonction des plages de température, des quantités de précipitations et des temps de précipitations (Kottek et al., 2006).

II.1.2.3 Classification de Martonne

Pour la conception des bâtiments, la méthode de Martonne est la plus simple et la plus pratique. Elle est basée sur l'indice d'aridité IDM de Martonne (1926), qui permet de faire une classification préliminaire de n'importe quelle région en utilisant l'expression:

$$\text{IDM} = P / (T_m + 10) \quad (\text{eq: II.1})$$

Où 'T_m' est la température moyenne annuelle et 'P' la somme des précipitations annuelles.

Sur la base de cette équation, quatre types de climats peuvent être identifiés:

- Climat froid, le principal problème avec ce type de climat est la chaleur insuffisante ou la perte de chaleur excessive pendant la majeure partie de l'année.
- Climat tempéré (modéré); se caractérise par des changements climatiques saisonniers mais ni trop chaud ni trop froid.
- Climat chaud et sec; le principal problème est la surchauffe et l'air sec ; l'humidité relative est très faible et l'amplitude entre le jour et la nuit est importante.
- Climat chaud et humide; le degré de réchauffement n'est pas aussi élevé que dans un climat chaud et sec, mais l'humidité est élevée, limitant l'évaporation. Les changements de température journaliers sont minimales.

II.1.3 Climats arides

La majorité des gens associent le terme 'sécheresse' aux régions sèches qui produisent une certaine d'images, y compris une végétation rare comme des plantes succulentes et autres xérophytes, des dunes de sable, de faibles précipitations et des températures élevées. En effet, l'aridité est un phénomène climatique caractérisé principalement par un manque d'eau. Ces zones sont généralement définies comme des zones avec des précipitations peu fréquentes et des températures élevées, qui constituent une limitation fondamentale pour les populations animales et végétales, ainsi que pour les activités humaines telles que l'agriculture.

Selon la classification de Köppen, le climat aride est divisé en quatre sous-types: climat désertique froid BWk, climat désertique chaud BWh, climat semi-aride froid BSk et climat semi-aride chaud BSh (Figure II.1). De sorte que la sécheresse se produit également dans les climats froids, où les précipitations sont principalement sous forme de neige dans les déserts polaires de l'Arctique et de l'Antarctique. En conséquence, les déserts deviennent plus secs, car il n'y a presque pas de précipitations nettes chaque année.

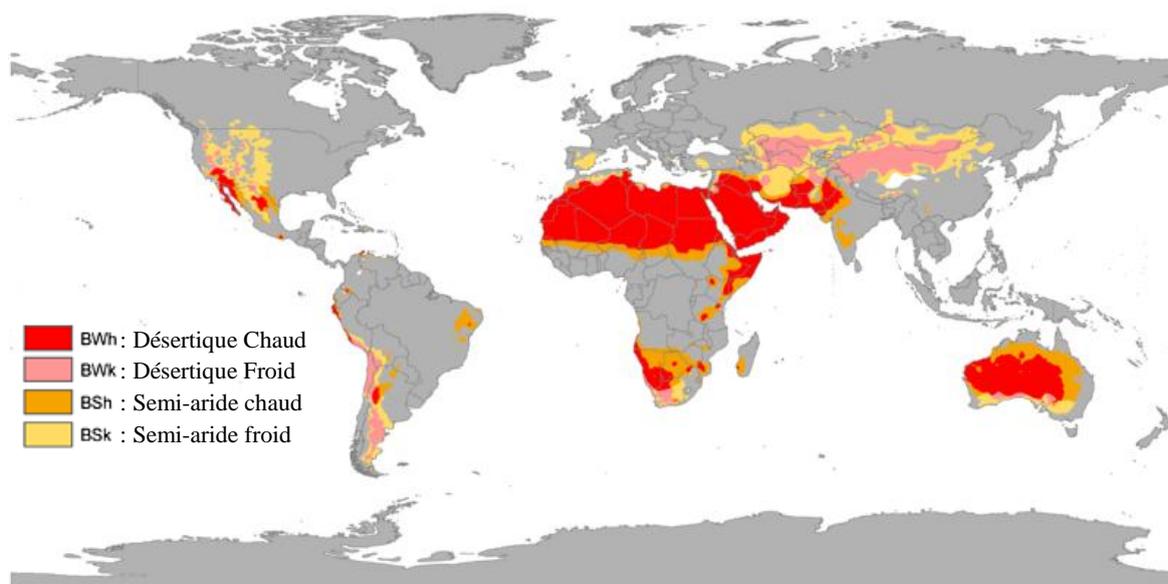


Figure II. 1 : Classification des climats arides selon la méthode Köppen, (Source : www.wikiwand.com/en/Desert_climate, adaptée par l'auteur, 2020.)

II.1.3.1 Climat chaud et sec

Le climat chaud et sec est le contexte climatique de la présente recherche, il est localisé dans de nombreuses régions du monde. Dans son ouvrage 'L'homme, l'architecture et le climat', Givoni (1978) indique que le climat chaud et sec se trouve dans deux ceintures entre environ 15° et 30° au nord et au sud de l'équateur. Dans les régions subtropicales d'Afrique, d'Asie centrale et occidentale, du nord-ouest et du sud de l'Amérique et du centre et de l'ouest de l'Australie. De plus, ces zones représentent 15% de la population mondiale, 1/3 de la superficie terrestre mondiale, et 22% de toutes les terres arables potentielles.

Sans oublier que la majorité des réserves énergétiques mondiales, comme le pétrole et le gaz, sont situées dans ou à proximité de ces zones. Selon Gut and Ackerknecht (1993), les principales caractéristiques de ce climat sont qu'il fait chaud en été et frais en hiver, avec une grande différence de température entre le jour et la nuit, une faible humidité et peu de précipitations. Il les a décrits en détail comme suit:

Le climat chaud et sec se caractérise par des températures estivales élevées de 40 à 50 °C, avec des différences de température importantes entre le jour et la nuit et de saison en saison. En été, la température de l'air augmente rapidement après le lever du soleil, atteignant une température moyenne maximale de plus de 40 °C, avec un record maximal de 58 °C. La température baisse d'environ 20°C la nuit. De plus, la température hivernale moyenne est d'environ 30 °C, avec des températures nocturnes d'environ 10 à 20 °C ou plus, selon l'altitude. Dans les zones marines, la température est légèrement plus basse, cependant, pendant la saison chaude la température moyenne maximale est d'environ 40 °C, avec une baisse de 10 à 15 °C la nuit. Pendant la saison fraîche, la température maximale moyenne est d'environ 25 °C, avec une baisse similaire le soir (Gut & Ackerknecht, 1993).

L'humidité relative dans les zones continentales est extrêmement faible, comprise entre 10% et 55%. Cependant, dans les zones côtières, elle peut atteindre jusqu'à 90% ; cet important taux d'humidité combiné à la température élevée crée un climat très inconfortable. Des précipitations (pluie, neige) sont peu fréquentes, irrégulières et peu fiables, mais peuvent néanmoins provoquer de graves inondations (Gut & Ackerknecht, 1993). En outre, les caractéristiques les plus significatives d'un climat chaud et sec sont un ciel clair, un rayonnement solaire intense (plus de 800 ou 900 w/m² sur une surface horizontale) et une longue durée de rayonnement solaire, surtout en été. Ces conditions climatiques ont un impact significatif sur les bâtiments et le confort humain qui en résulte. La grande quantité de chaleur emmagasinée pendant la journée est irradiée dans le ciel nocturne froid sous forme de rayonnement (Gut & Ackerknecht, 1993).

La chaleur générée par l'humidité et les différences de température sont les causes les plus courantes de vents très variables. Pendant la journée, ils sont souvent forts et violents et évoluent facilement en tempêtes. En hiver, les vents froids et les tempêtes de poussière ou sable sont dominants. Dans les zones côtières, une configuration de vent constante existe, soufflant de la mer vers la terre pendant la journée et inversant vers la mer la nuit (Gut & Ackerknecht, 1993).

II.1.3.2 Localisation du climat chaud et sec en Algérie

Après avoir présenté la distribution du climat chaud et sec dans le monde et ses caractéristiques météorologiques, il est indispensable de jeter la lumière sur la localisation du climat chaud et sec en Algérie.

L'Algérie est un pays d'Afrique du Nord avec un littoral s'ouvrant sur la mer Méditerranée et un intérieur désertique. Selon Mokhtari et al. (2008), le climat chaud et sec caractérise plus de

85% de la superficie totale de l'Algérie. La figure II.2 représente les zones climatiques du pays; le climat chaud et sec a été divisé en deux zones climatiques: estivale (E3, E4 et E5) et hivernale (H3a, H3b et H3c). L'altitude a un effet important sur toutes ces zones. Pour plus de détails, les zones ont été décrites comme suit:

- La zone E3 (Présaharienne et Tassili), l'été est très chaud et sec.
- La zone Sahara E4 a un été plus difficile que la zone E3.
- la zone E5 de Tanezrouft est la plus chaude d'Algérie.
- La zone H3a (Présaharien), la hauteur varie entre 500 et 1000 mètres, avec des températures diurnes très froides par rapport aux températures nocturnes.
- Zone H3b (désert saharien), de 200 à 500 mètres d'altitude, où les hivers sont moins froids que dans la zone H3a.
- La zone H3c (Hoggar), à une hauteur de plus de 500 mètres, a des hivers rigoureux similaires à la zone H3a, mais ils durent toute la journée.

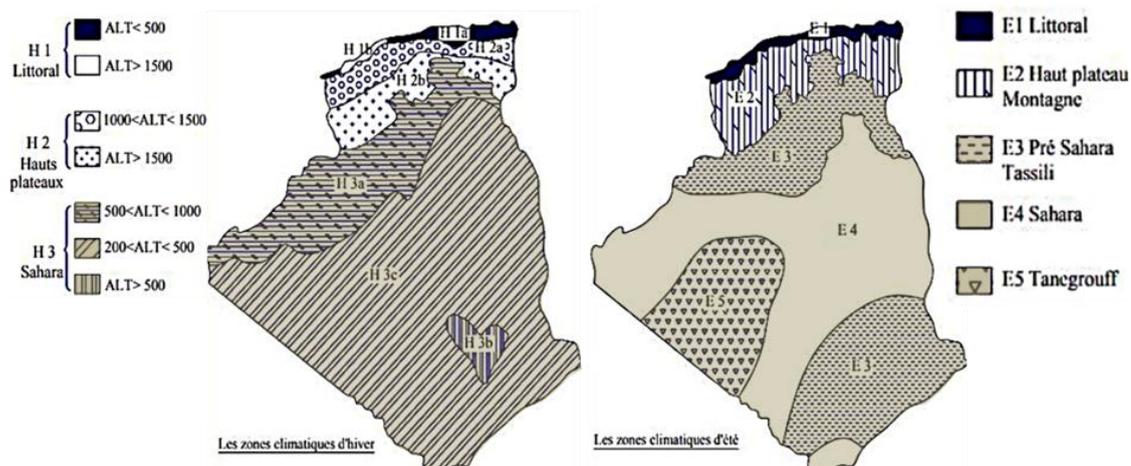


Figure II. 2 : Le climat chaud et sec en Algérie. Source : (Mokhtari, 2008) adaptée par l'auteur.

II.1.4 Principes de conception en climat chaud et sec

L'objectif principal de la conception dans un contexte climatique chaud et sec est de fournir des conditions de vie confortables en réduisant les situations gênantes causées par les conditions extrêmes de chaleur et de sécheresse, et en particulier de se protéger contre les radiations solaires élevées du soleil, du sol et des bâtiments environnantes.

Les bâtiments doivent être conçus pour résister à des conditions météorologiques extrêmes afin de maintenir un climat intérieur équilibré. De plus, une réduction minimale des apports d'énergie est nécessaire, non seulement pour le refroidissement, mais aussi pour le chauffage qui peut être demandé en hiver et pendant les nuits froides. C'est pour cette raison qu'une

recherche approfondie sur les principes de la conception architecturale dans un climat chaud et sec est requise. Gut & Ackerknecht (1993) donnent un certain nombre de principes de conception pour les climats chauds et arides. Nous les examinerons plus en détail dans la section suivante.

II.1.4.1 Forme de tissu urbain

La compacité et l'ombre sont les principes de construction les plus importants dans les climats chauds et secs. La texture compacte des tissus urbains offre une protection idéale contre le rayonnement solaire, de sorte que les bâtiments se protègent les uns les autres par ombrage mutuel (Figure II.3). En outre, la structure urbaine se présente selon un réseau de rues étroites ombragées et de petites placettes avec une végétation dense. Arcades, colonnades, des bâtiments à porte-à-faux ou éléments de construction saillants, membranes couvrantes et petits chemins protégés sont quelques-unes des réponses traditionnelles aux radiations solaires élevées (Gut & Ackerknecht, 1993).

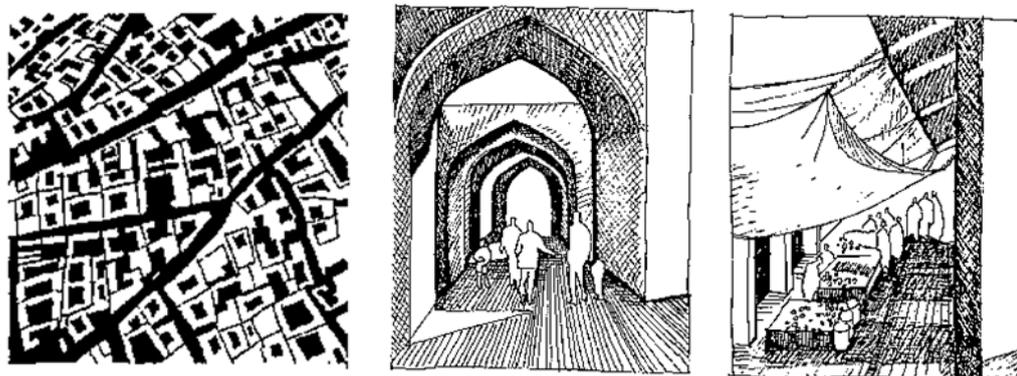


Figure II. 3 : Modèles urbains des zones chaudes et sèches. Source : (Gut & Ackerknecht, 1993)

II.1.4.2 Conception du bâtiment

Selon Gut & Ackerknecht (1993), l'orientation optimale du bâtiment doit être déterminée afin d'obtenir la répartition la plus satisfaisante des gains et pertes de chaleur en toutes saisons. Ainsi, la plus grande dimension du bâtiment doit faire face au Nord et au Sud, généralement, l'orientation Ouest est à éviter, c'est la plus défavorable car la température de l'air élevée durant l'après-midi se trouve combinée à un fort rayonnement solaire.

Les murs principaux et les fenêtres doivent faire face à la direction du vent dominant frais, pour maximiser la ventilation transversale de la pièce. La forme et le volume du bâtiment doivent être compacts, mais ils doivent être allongés le long de l'axe est-ouest (Figure II.4.a), la forme

optimale est (1:1.3). En général, la meilleure forme est celle qui assure des gains de chaleur minimaux en été et maximaux en hiver.

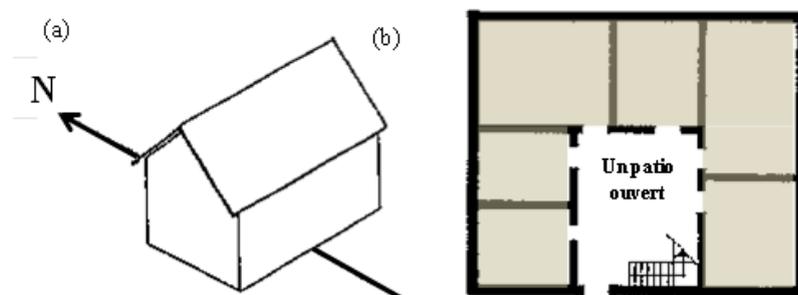


Figure II. 4 : Orientation optimale du bâtiment, (b) maison à patio une conception typique en climat chaud et sec. Source : (Gut & Ackerknecht, 1993)

Une maison compacte de type 'patio' est donc préférable. Le patio est une cour vers laquelle s'ouvrent les pièces de la maison, en l'absence d'ouvertures sur la façade, notamment, dans le cas des tissus compacts où la mitoyenneté est poussée à l'extrême (Figure II.4.b). Cette typologie de maison urbaine minimise l'impact du rayonnement solaire sur les parties extérieures, et fournit une zone fraîche à l'intérieur du bâtiment. Le patio répond également à d'autres exigences telles que la sécurité, l'intimité, la défense, le style de vie, etc.

II.1.4.3 Murs, fenêtres et matériaux

D'après Gut and Ackerknecht (1993), les murs massifs avec une réflexion élevée sont requis dans les climats chauds et secs. Pendant la saison chaude, les espaces d'utilisation diurne doivent être construits avec des murs constitués de matériaux de stockage de chaleur. En outre, les murs des espaces d'utilisation nocturne doivent avoir une légère capacité thermique. Les murs Est et Ouest doivent être les mieux ombragés. Un mur double peaux avec isolation intermédiaire est une solution appropriée dans les régions où la plage de températures diurnes est moins extrême et la température nocturne ne tombe pas en dessous de la zone de confort. Dans ce cas, les murs extérieurs et le toit nécessitent une isolation et une réflectivité élevées, tandis que les murs intérieurs et les planchers intermédiaires doivent avoir de grandes masses thermiques (Figure II.5.a).

En ce qui concerne les régions avec de grandes plages de températures diurnes et des températures nocturnes inférieures au niveau de confort, il est nécessaire de prévoir des murs intérieurs et extérieurs et des toits possédant une grande capacité thermique avec un délai de restitution (time-lag) approprié pour équilibrer les variations de température. Pour y parvenir,

ils doivent être construits avec des matériaux lourds (à forte inertie thermique). L'utilisation de matériaux isolants externes ou internes doit être soigneusement étudiée, en adéquation avec les exigences spécifiques et des possibilités techniques.

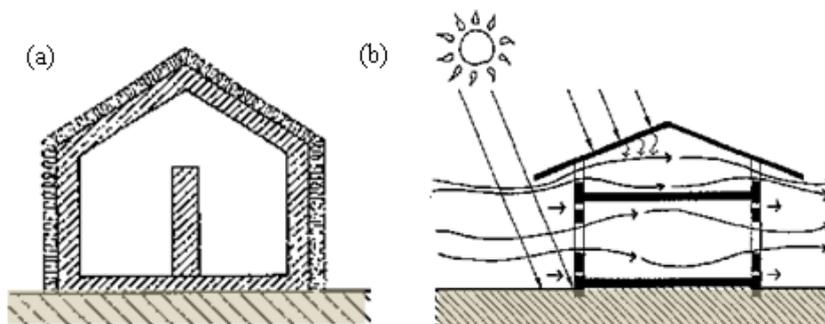


Figure II. 5 : (a) La masse de stockage à l'intérieur de l'isolant est efficace, (b) Placement des ouvertures. Source : (Gut & Ackerknecht, 1993)

Les fenêtres sont nécessaires pour un éclairage naturel approprié et la ventilation, cependant, le gain de chaleur en été devrait être minime. La profondeur des pièces et la taille des fenêtres doivent être coordonnées. Les ouvertures principales doivent être orientées au nord et au sud, mais ces dernières doivent être protégées par des dispositifs d'ombrage. En effet, il est recommandé d'ouvrir vers le sud pour capter le rayonnement solaire pendant la saison froide, mais cela ne devrait pas favoriser le rayonnement direct pendant l'été.

D'après Gut and Ackerknecht (1993) les fenêtres doivent être aussi petites que possible et être protégées du rayonnement direct pendant la journée surtout du côté ouest. En outre, elles devraient être ouvertes la nuit pour assurer une ventilation adéquate devant favoriser la dissipation de la chaleur émise par les murs et le toit. L'éblouissement provoqué par l'excès de lumière naturelle directe peut également être évité par l'utilisation de dispositifs fournissant un éclairage réfléchi. Pour les parties transparentes, habituellement, un simple vitrage suffit. Le verre isolant et le verre spécial absorbant et réfléchissant la chaleur ne conviennent généralement qu'aux bâtiments climatisés. Des joints et des contours de fenêtre bien fermée sont importants pour empêcher l'intrusion d'air chaud, de sable, de poussière et d'insectes. Les ouvertures doivent être placées dans des positions appropriées par rapport à la brise fraîche dominante. Un mouvement d'air naturel dans le bâtiment permet de refroidir le corps par évaporation. Les stores peuvent être orientés horizontalement vers le corps humain, ou bien vers le plafond où l'air chaud a tendance à s'accumuler. Dans ce cas l'ouverture de sortie doit être située à une position élevée proche du plafond (Figure II.5.b).

II.1.4.4 Couleurs

Les couleurs externes sont requises en tant que combinaison d'une réflectivité élevée du rayonnement solaire et d'une émissivité élevée du rayonnement infrarouge vers le ciel dégagé la nuit. Il est également préférable d'utiliser les surfaces blanches non brillantes et d'éviter toutes les surfaces de couleur foncée. En effet, la peinture blanche a un taux de réflexion élevé sur les surfaces exposées au soleil. Par contre, les couleurs sombres absorbantes sont plutôt propices pour les surfaces dont la réflexion vers l'intérieur doit être évitée comme sous les avant-toits. Les surfaces à prise profonde peuvent être de couleur foncée pour l'absorption du rayonnement hivernal. Les contrastes de couleurs vives doivent être en accord avec les caractéristiques générales de l'architecture de la région. Les couleurs internes, telles que les couleurs 'froides' et vives, peuvent être utilisées psychologiquement comme un contraste rafraîchissant avec une chaleur extérieure intense et en même temps pour diffuser la lumière naturelle dans le cas de pièces profondes (Gut & Ackerknecht, 1993).

II.1.4.5 Végétation

Dans les zones chaudes et arides caractérisées par des réserves d'eau limitées, les plantes avec des besoins en eau élevés peuvent ne pas être possibles, mais les plantes adaptées aux conditions locales sont toujours avantageuses. La végétation améliore le microclimat à la fois à l'extérieur et à l'intérieur, et contrôle les vents chauds et poussiéreux fréquents dans les régions arides. Grâce à la transpiration des feuilles, les températures sont abaissées, les arbres sont un moyen très efficace d'améliorer le climat. Ils constituent le moyen le plus simple d'ombrager les espaces extérieurs et les bâtiments.

À ce titre, il est important de sélectionner le type d'arbre approprié, par exemple, les xérophytes nécessitent peu ou pas d'eau. De même, l'utilisation d'arbres à feuilles caduques qui fournissent de l'ombre pendant la saison chaude et laissent passer le rayonnement solaire en hiver, constitue une solution simple pour réguler l'ombrage des arbres tout au long de l'année. Un autre élément qui peut aider à choisir le bon arbre est son 'facteur de refroidissement'. Lors de la mesure de l'intensité du rayonnement à l'ombre d'un arbre, l'efficacité des différentes espèces varie. La Figure II.6 donne des valeurs du 'facteur de refroidissement' pour différentes espèces d'arbres, les valeurs indiquées représentent le taux de l'intensité du rayonnement à l'ombre de l'arbre par rapport aux conditions non ombragées (Gut & Ackerknecht, 1993).

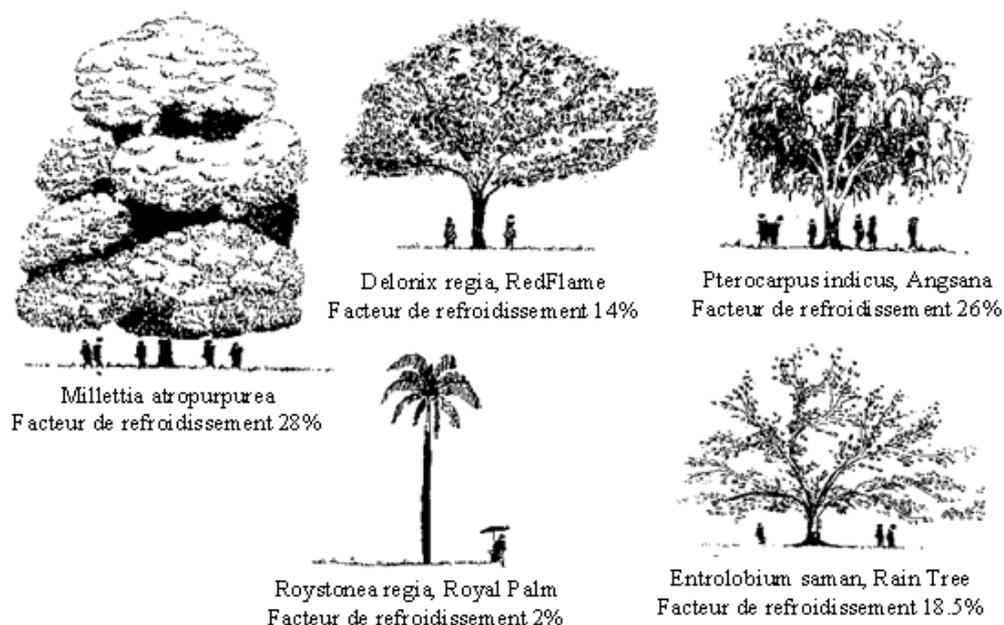


Figure II. 6 : Végétation adaptée avec le climat chaud et sec. Source: (Gut & Ackerknecht, 1993)

II.2 Exigences humaines concernant le climat intérieur

Les exigences de l'être humain vis-à-vis de son environnement intérieur sont déterminées par son mode de vie et sa culture, influençant ce qu'il porte, les espaces qu'il occupe et la façon dont il les occupe. Pourtant, cette relation est souvent simplifiée à l'extrême dans la conception des espaces conditionnés, supposant implicitement que les occupants ont des préférences thermiques inchangées et peu ou pas de désir de participer à la création des conditions de leur bien-être physiologique (Mackey, 2015). Pourtant, lorsque le corps humain est exposé à un environnement thermique, il réagit par un ensemble de réponses rétrospectives volontaires et involontaires, qui permettent de contrôler l'échange thermique dans cet environnement pour répondre aux exigences de température corporelle (Moujalled, 2007).

II.2.1 Mécanisme du corps humain

Le corps humain possède la capacité d'équilibrer sa température par divers moyens, la température interne du corps humain doit toujours être maintenue dans des limites étroites à environ 37°C. Toute variation par rapport à cette valeur est un signe de maladie et une élévation de 5°C ou une baisse de 2 °C par rapport à cette valeur peut entraîner la mort (Gut & Ackerknecht, 1993). La chaleur nécessaire est produite continuellement dans le corps par ce que l'on dénomme le processus métabolique qui transforme de l'énergie chimique en chaleur. Si la chaleur produite dans le corps dépasse celle transférée vers l'environnement, le corps se

réchauffe et sa température interne s'élève ; dans le cas inverse, il se refroidit avec un abaissement conséquent de sa température interne.

Les échanges thermiques entre le corps et l'environnement peuvent se dérouler par conduction, convection, rayonnement et évaporation. A partir de (Gut & Ackerknecht, 1993). La conduction thermique c'est un mode d'échange thermique en contact immédiat des matériaux avec la peau. La convection dépend principalement de la différence de température entre la peau et l'air et du mouvement de l'air, qui peut être contrôlée par des vêtements adéquats. Alors que le rayonnement c'est un mode de transfert de la chaleur à distance entre le corps humain et les surfaces environnantes. Quand les températures sont basses, la chaleur se dissipe principalement par rayonnement et conduction/convection (part sensible des échanges de chaleur avec l'environnement). Par contre, quand les températures prennent des valeurs proches de celle du corps, la chaleur s'évacue pratiquement uniquement par évaporation (part latente).

Le corps peut gagner ou perdre de la chaleur dépend principalement la différence de la température entre la peau de la personne et l'environnement. Le mécanisme de l'évaporation se traduit par la transpiration et la respiration, les humains perdent environ un litre d'eau par jour en transpiration. Une bonne quantité de chaleur est prélevée sur le corps pour l'évaporer par la transpiration, qui associée dans une certaine mesure à la respiration, pendant l'évaporation, l'eau absorbe la chaleur. Plus la pression de vapeur est basse (air sec) et plus le mouvement de l'air est important, plus le potentiel d'évaporation est grand. L'équilibre thermique du corps humain est exprimé selon l'équation suivante (Batier, 2016) :

$$Q_{SK} = C + R + K + E_{SK} \quad (\text{Eq : II.2})$$

Où :

Q_{SK} : Le flux de chaleur échangé à la surface de la peau (W/m^2)

C : L'échange de chaleur par convection (W/m^2)

K : L'échange de chaleur par conduction (W/m^2)

R : L'échange de chaleur par rayonnement (W/m^2)

E_{SK} : L'échange de chaleur par évaporation de la sueur (W/m^2)

Le processus de la respiration entraîne une perte de chaleur sensible (changement de température sans changement d'état) les échanges s'effectuent par convection (C_{RES}) et une perte de chaleur latente (énergie dissipée lors du changement d'état) par évaporation (E_{RES}) (Batier, 2016). Selon l'équation suivante :

$$Q_{RES} = C_{RES} + E_{RES} \quad (\text{Eq : II.3})$$

Où :

Q_{RES} Flux de chaleur échangé par la respiration, W/m^2

C_{RES} : Échanges thermiques par la convection respiratoire, W/m^2

E_{RES} : Échanges thermiques par l'évaporation respiratoire, W/m^2

Le corps humain dissipe plus de 50% de chaleur par convection et évaporation (l'évaporation et la sudation qui comptent pour 24 %), jusqu'à 35 % par rayonnement, et seulement moins de 1% par conduction, ce qui est considéré comme négligeable (Batier, 2016).

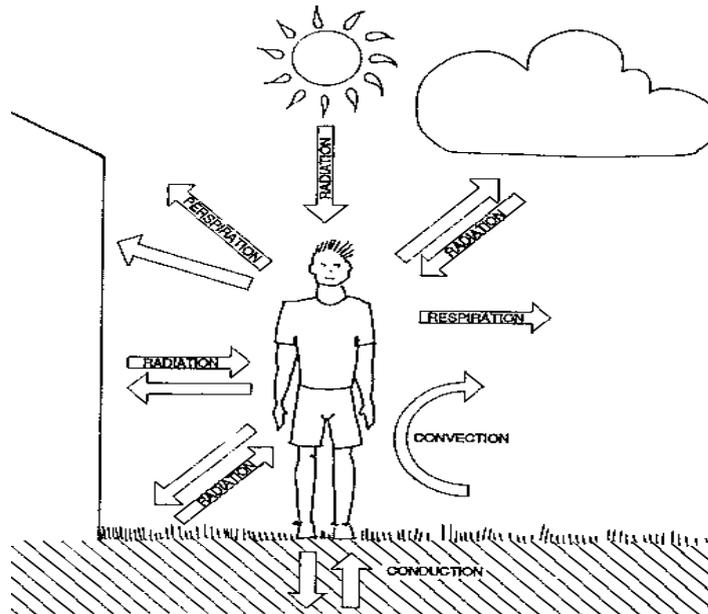


Figure II. 7 : Interactions thermiques entre l'homme et son environnement. Source: (Gut & Ackerknecht, 1993)

II.2.2 Confort thermique intérieur

Le confort thermique est une sensation de bien être lorsqu'on est exposé à une ambiance intérieure. Correspond sur le plan physique à un état d'équilibre thermique entre le corps humain et les conditions d'ambiance dans lesquelles il se trouve.

Dans l'environnement bâti, le confort thermique est l'exigence de base à laquelle les concepteurs doivent apporter les réponses nécessaires, ce qui a conduit à des recherches approfondies diffusées dans le cadre d'une abondante littérature scientifique. La définition du confort thermique est très importante pour un bâtiment afin de lui permettre d'atteindre ses objectifs fonctionnels. Les paramètres qui définissent le confort thermique d'une personne s'appuient sur des recherches scientifiques et statistiques portant sur le système de thermorégulation du corps humain. Ils sont regroupés dans l'équation du confort de P.O. Fanger. Selon la norme

ASHRAE (2010) le confort thermique est défini comme l'état d'esprit qui exprime la satisfaction envers l'environnement thermique. C'est un état d'équilibre hygrothermique du corps humain qui ne doit avoir ni chaud, ni froid. Cela signifie une satisfaction de l'individu à l'égard son environnement.

En voulant créer un confort thermique, un concepteur vise avant tout à satisfaire le désir humain de se sentir à l'aise thermiquement. Cependant, il est difficile de satisfaire tout le monde dans un espace, en raison de la grande diversité physiologique et psychologique d'une personne à l'autre. Les conditions environnementales requises pour le confort ne sont pas les mêmes pour tout le monde. La sensation subjective personnelle implique que malgré une 'équation précise de confort', toutes les personnes ne se sentent pas toujours bien dans un climat intérieur déterminé.

D'après Fanger (1970) lorsqu'un groupe de personnes est soumis au même climat ambiant, il est impossible de satisfaire tout le monde en même temps à cause des différences qui distinguent les individus. Par conséquent, il est nécessaire de viser à créer une condition dans laquelle le pourcentage le plus élevé possible du groupe est en situation de confort thermique. Les mécanismes d'autorégulation du corps humain laissent apparaître une zone où la variation de confort thermique est faible : c'est la plage de confort thermique.

Six facteurs importants doivent être pris en compte lors de la détermination des conditions de confort thermique. Certains sont liés à l'individu, d'autre à l'environnement, voici la description détaillée ci-dessous :

II.2.2.1 Habillement

L'âge et le sexe affectent les préférences thermiques: les personnes âgées ont tendance à avoir une plage de confort plus étroite, et les femmes préfèrent généralement une température supérieure à celle des hommes (Auliciems & Szokolay, 1997). L'isolation des vêtements représente une résistance thermique aux échanges de chaleur entre la surface de la peau et l'environnement, obtenue en ajoutant un vêtement individuel sur le corps nu. L'estimation du niveau d'habillement des occupants est caractérisé par une valeur relative exprimé en unités 'clo'. Cela correspond à une couverture isolante sur tout le corps d'une transmittance (valeur U) de $6.45 \text{ W} / \text{m}^2\text{K}$ (soit une résistance de $0.155 \text{ m}^2\text{K} / \text{W}$), La valeur totale du clo d'un ensemble est de 0.82 fois la somme des éléments individuels. Le tableau II.1 donne les valeurs clo de diverses pièces de vêtements pour les hommes ainsi que les femmes.

Tableau II. 1 : Le niveau d'habillement exprimer en 'clo'. Source : (Auliciems et Szokolay 1997)

Homme		clo	Femmes		clo
sous-vêtements	maillots	0.06	sous-vêtements	soutien-gorge + culottes	0.05
	T-shirt	0.9		demi-slip	0.13
	demi-slip	0.05		glissement complet	0.19
	long, inférieur	0.35		long, supérieur	0.35
	long, inférieur	0.35		long, inférieur	0.35
chemise	légère, manches courtes	0.14	chemisier	légère	0.2
	légère, manches longues	0.22		lourd	0.29
	Lourde, manches courtes	0.25	robe	légère	0.22
	Lourde, manches longues	0.29		lourd	0.70
	+ 5% pour cravate ou col roulé)				
gilet	légère	0.15	jupe	légère	0.10
	Lourde	0.29		Lourde	0.22
pantalon	légère	0.26	pantalon	légère	0.26
	Lourde	0.32		Lourde	0.44
chandail	légère	0.20	chandail	légère	0.17
	Lourde	0.37		Lourde	0.37
veste	légère	0.22	veste	légère	0.17
	Lourde	0.49		Lourde	0.37
chaussettes	longueur de la cheville	0.04	chaussettes	longueur de la cheville	0.01
	longueur genou	0.10		longueur genou	0.01
chaussure	des sandales	0.02	chaussure	des sandales	0.02
	des chaussures	0.04		des chaussures	0.04
	bottes	0.08		bottes	0.08

II.2.2.2 Métabolisme

Il s'agit de la génération de la chaleur interne du corps humain, pour le maintenir à une température d'environ 36.7 ° C. Ce facteur change en relation du type d'activité du corps humain, ce qui affecte directement la température du confort. D'après la norme (ASHRAE, 2010) le taux métabolique (M) est un taux de transformation de l'énergie chimique en chaleur et en travail mécanique par les activités métaboliques au sein d'un organisme, généralement exprimé en termes de surface unitaire de la surface corporelle totale. Il est exprimé en unités 'met', cette dernière est une unité utilisée pour décrire l'énergie générée à l'intérieur du corps en raison de l'activité métabolique, définie comme 58.2 W/m² (18.4 Btu/h·ft²), qui est égale à l'énergie produite par unité de surface d'une personne moyenne assise, au repos. La superficie d'une personne moyenne est de 1.8 m² (19ft²). Voici diverses valeurs du métabolisme indiquées selon le type d'activité (Tableau II.2).

Tableau II. 2 : Divers valeurs du métabolisme selon le niveau d'activité (Source : Auliciems et Szokolay 1997)

Activité	met	W / m²	W (av)
Dormir	0.7	40	70
Inclinable, couché dans son lit	0.8	46	80
Assis, au repos	1.0	58	100

Travail debout, sédentaire	1.2	70	120
Travaux très légers (courses, cuisine, industrie légère)	1.6	93	160
Travaux moyennement légers (maison, machine-outil)	2.0	116	200
Travail moyen régulier (marteau-piqueur, danse sociale)	3.0	175	300
Travaux lourds (sciage, rabotage à la main, tennis) jusqu'à	6.0	350	600
Travaux très lourds (squash, travail au four) jusqu'à	7.0	410	700

II.2.2.3 Température de l'air

C'est la température de confort ressentie, appelée aussi 'température opérative' ou 'température résultante sèche', elle est considérée comme le paramètre environnemental le plus influant sur le confort thermique (Auliciems & Szokolay, 1997). De façon simplifiée, c'est la température de l'air environnant l'occupant, on définit une température de confort ressentie par une relation simple (eq: II.4) qui s'applique pour autant que la vitesse de l'air ne dépasse pas 0,2 m/s.

$$T^{\circ}rs = (T^{\circ}a + T^{\circ}p) / 2 \quad (\text{eq : II.4})$$

Où :

$T^{\circ}rs$ est la température de confort ressentie, °C

$T^{\circ}a$ est la température ambiante de l'air, °C

$T^{\circ}p$ est la température des parois, °C

Un individu en état de repos est plus sensible à la variation de la température. Dans des conditions normales, la température corporelle d'un individu est à environ 36.7 ° C. Cette température est en permanence supérieure à la température d'ambiance, aussi un équilibre doit-il être trouvé afin d'assurer le bien-être de l'individu. Pour une personne en bonne santé assise, convenablement vêtue à une vitesse de l'air de 0.1 m/s et une humidité relative de 50%, les valeurs acceptables de $T^{\circ}rs$ vont de 16°C à 32°C avec un optimum à environ 21°C.

II.2.2.4 Température radiante

La température radiante ou bien la température des parois (T_p) influence les échanges thermiques par rayonnement. La répartition des températures sur une paroi est un phénomène complexe mais on admet que T_p est égale à la moyenne des températures des parois environnantes pondérées par leur surface. De façon simplifiée, elle correspond à la température uniforme de surface d'une boîte noire imaginaire dans laquelle un occupant échangerait la même quantité de chaleur radiante que dans l'espace non uniforme réel (ASHRAE, 2010). La température radiante moyenne peut naturellement être définie par rapport à n'importe quel corps ou surface, il est important de préciser que la posture du corps joue un certain rôle; la température radiante moyenne par rapport à une personne debout ne doit pas nécessairement

être la même que par rapport à une personne assise. De même, l'emplacement et l'orientation de la personne dans la pièce doivent être connus, car la température radiante moyenne variera souvent d'un point à l'autre et pour le même point également, avec l'orientation azimutale du corps (Fanger, 1970).

La figure II.8 illustre l'effet de la température radiante sur la température résultante sèche (température de confort ressentie) telle que définie plus haut. Pour une paroi non isolée (à gauche), la température de surface (T_p) est basse : 12 °C . Pour une température de l'air ambiant (T_a) de 20 °C , la température résultante (T_{rs}) sera donc de 16 °C , soit une température inconfortable : c'est l'effet dit "de paroi froide". Le corps perd de la chaleur en direction des sources froides.

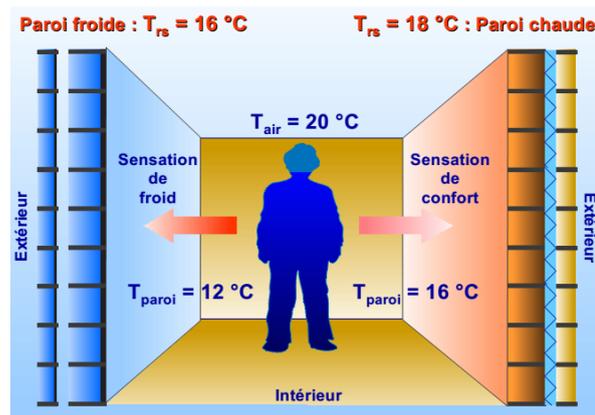


Figure II. 8: Effet de la température radiante sur la température opérative. Source: (Liébard & De Herde, 2005)

II.2.2.5 Humidité relative

L'humidité relative (HR) mesure le rapport de la densité de la vapeur d'eau ou la quantité d'eau contenue dans l'air à la densité maximale de la vapeur d'eau à la même température exprimé en pourcentage (%). L'humidité relative qui l'entoure affecte la capacité de notre corps à dissiper la chaleur et impacte la sensation de confort. Selon Jedidi & Benjeddou (2016) la plage de l'humidité relative acceptable s'étend de 30 % à 65 %, l'optimum étant d'environ 50 %. Il est difficile de ressentir du confort lorsque l'humidité relative est inférieure à 30 % et supérieure à 70 %. L'humidité relative supérieure à 70 % entraîne une prolifération bactérienne accrue et la condensation sur les surfaces froides.

En général, l'air ne peut absorber qu'une quantité limitée de vapeur d'eau. En ambiance chaude, dans des conditions de température données, les échanges thermiques du corps avec son environnement ont lieu principalement par évaporation à la surface de la peau. Aussi, dans une ambiance saturée où il n'est plus possible de transpirer, le corps est la plupart du temps en position d'inconfort. A l'inverse, dans une ambiance sèche, la transpiration est facilitée et permet de supporter des températures ambiantes plus élevées (Liébard & De Herde, 2005).

L'humidité a des corrélats plus subjectifs que la chaleur et l'humidité perçue. Les gens peuvent détecter les changements d'humidité atmosphérique à une température de l'air confortable de 23 °C et trouver un niveau de 50% plus confortable et moins oppressant que 20 % ou 75 %. L'effet de l'humidité sur la sensation de chaleur à cette température est faible. À une température plus élevée 28 °C, l'augmentation de l'humidité de 20 % rend le climat intérieur plus chaud et moins confortable (McIntyre & Griffiths, 1975).

II.2.2.6 Vitesse de l'air

Le mouvement de l'air est un facteur qui affecte la sensation de confort physiologique de l'individu. Il est mesuré par sa vitesse (m/s) et intervient dans la sensation de confort thermique de l'occupant dès que la vitesse de l'air est supérieure à 0.2 m/s : c'est en effet à partir de cette vitesse qu'un courant d'air peut être ressenti par un individu moyen. Le mouvement de l'air agit sur la teneur en humidité de la peau, augmente l'évaporation à la surface de la peau et contribue aux échanges de chaleur par convection ; il a donc un effet rafraîchissant par évaporation.

Considérant que le mouvement de l'air réduit la température du corps, il est souhaitable en été durant les périodes de surchauffe (températures élevées), mais peut être gênant en hiver. Le mouvement de l'air à une température inférieure à 37 °C refroidit le corps, tout en le chauffant à une température de l'air supérieure à 37 °C. À l'intérieur du bâtiment l'impact sur l'individu est négligeable si le débit d'air ne dépasse pas 0.2 m/s. Selon l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO) 7730, la vitesse moyenne de l'air doit être inférieure à 0.25 m/s pour les environnements thermiques modérés avec une activité légère. En hiver, elle devrait être inférieure à 0.15 m/s (Holm & Engelbrecht, 2005).

II.2.3 Mesure du confort thermique

Le confort thermique est subjectif, il est alors difficile de le mesurer et de l'évaluer. Néanmoins, cette notion a suscité l'intérêt de nombreuses études, surtout dans le domaine du bâtiment. Au

fil du temps, la littérature scientifique a introduit plusieurs paramètres pour évaluer la réponse thermique humaine aux conditions climatiques. Ainsi, nombreux indices et méthodes d'estimation du confort thermique ont été développés, décrivant la perception humaine de l'environnement thermique auquel un individu ou un groupe de personnes sont exposés (Carlucci, 2013). L'environnement thermique peut être défini suivant quatre paramètres : température de l'air, de rayonnement, de contacts, humidité et vitesse de l'air. Ils doivent cependant être combinés avec l'activité et l'habillement de l'individu pour caractériser les échanges thermiques entre l'homme et son environnement.

Pour évaluer le confort thermique, de multiples modèles de caractérisation du confort cherchent à modéliser les échanges thermiques entre l'homme et son environnement. Pour cela, ils prennent en compte des facteurs environnementaux (la température de l'air, la température de rayonnement, l'humidité de l'air et la vitesse de l'air) mais également des différences individuelles. À partir de ces paramètres, il existe de multiples modèles de caractérisation du confort dans un bâtiment. Mais fréquemment, deux approches sont utilisées. La première repose sur la méthode de Fanger qui aborde le confort thermique d'une manière analytique 'statique' et le réduit à son aspect physique et physiologique. La deuxième méthode se base sur la théorie du confort adaptatif qui considère que les conditions de confort dépendent grandement du contexte, du comportement des occupants et de leurs attentes.

II.2.3.1 Approches analytique

L'objectif de l'approche analytique est de prédire la sensation thermique des occupants en se basant essentiellement sur le calcul du bilan thermique du corps humain. Généralement, les méthodes d'estimation du confort s'appuient sur des modèles physiques et physiologiques. Les modèles physiologiques du système de thermorégulation sont développés pour déterminer les grandeurs physiologiques de l'individu, alors que des modèles physiques sont utilisés pour calculer les échanges de chaleur entre l'occupant et son environnement tels que la conduction, convection, rayonnement et évaporation. Ces modèles utilisent comme variables d'entrée les grandeurs physiques de l'ambiance thermique (température d'air, température de rayonnement, humidité d'air et vitesse d'air), ainsi que les caractéristiques de l'individu (taille et poids de l'individu, production de chaleur métabolique, caractéristiques des vêtements, etc.). En sortie, la sensation thermique ou le niveau de confort pour les conditions étudiées sont estimées selon de nombreux indices (Cantin et al., 2005).

Généralement, les indices de confort thermique ont été développés sur la base de modèles disponibles dans différents formats. Il existe des modèles physiques dont la réponse physique est similaire à celle du corps humain. Il existe également des mannequins thermiques couramment utilisés pour déterminer les caractéristiques thermiques des vêtements. De plus, il y a des modèles empiriques établis à travers les expérimentations en combinant les effets de deux ou plusieurs variables en une seule variable dans les chambres climatiques ou in situ. Enfin, les modèles rationnels sont basés sur des estimations des divers types d'échange de chaleur entre le corps humain et des environnements thermiques. Les indices environnementaux simples concernent la température résultante ou température opérative, la température équivalente, et la température effective. Selon l'approche statique, il existe de multiples modèles de caractérisation du confort, tels que le modèle Fanger PMV/PPD, le modèle de Gagge, ou plus complexe tels que le modèle thermique de Stolwijk (Moujalled, 2007). Certains de ces modèles les plus couramment utilisés sont détaillés ci-après.

II.2.3.1.1 Modèle de Fanger PPD et PMV

La méthode Fanger (1967) est la plus largement utilisée pour l'évaluation du confort thermique, elle permet d'analyser les ambiances thermiques sous des conditions thermiques homogènes et stationnaires. Cette méthode consiste à déterminer de façon analytique les échanges thermiques entre le sujet et l'environnement en fonction de l'écart entre la chaleur produite et la chaleur dissipée par le corps humain vêtu (Moujalled, 2007). Fanger considère que la situation de confort thermique dépend de trois conditions, un bilan thermique équilibré, une sudation et une température moyenne de la peau située dans les limites du confort (Robillart, 2015). L'indice PMV (Predicted Mean Vote : Vote Prévisible Moyen) se base sur une évaluation de la sensation de confort obtenue dans des chambres climatisées. Le modèle a été créé à partir de corrélations issues du croisement des données de base des occupants, des données sur l'ambiance et des réponses des occupants sur leur état de confort. D'après (ASHRAE, 2010) le PMV est un indice qui permet de prédire l'avis moyen d'un grand groupe de personnes sur l'échelle de sensation thermique, en fonction de l'écart entre le flux de chaleur cédé par le corps à l'environnement et celui qui correspond aux conditions de confort. Il représente le vote moyen de la sensation thermique d'un groupe de personnes sur l'échelle de sensation à sept niveaux d'ASHRAE. Ainsi, pour une situation donnée, le confort est estimé en votes reposant sur une échelle (Tableau II.3) allant de -3 (très froid) et +3 (très chaud) où 0 est l'optimum (ni chaud, ni froid). Le PMV peut alors être calculé à partir des paramètres de l'environnement thermique et de

l'activité et de la vêtue des occupants. Le PMV de 0 exprime ainsi une sensation de confort thermique idéale.

Tableau II. 3: Echelle des indices PMV (Source : Robillart, 2015)

Echelle ASHRAE	La sensation
+3	Chaud
+2	Tiède
+1	Légèrement tiède
0	Neutre
-1	Légèrement frais
-2	Frais
-3	Froid

Cependant, le PMV n'étant pas suffisante pour exprimer le confort, Fanger a proposé un autre indice PPD (Predicted Percentage Dissatisfied : Pourcentage Prévisible d'Insatisfaits). Sont considérés comme satisfaits ceux dont la réponse sur l'échelle d'ASHRAE aura été -1, 0, +1. Cependant face à une situation de confort (pour un vote de 0), il y aura toujours 5 % d'insatisfaits. Cet indice est l'extension statistique du nombre de personnes insatisfaites pour un indice PMV variant de 5 % (PMV de 0) à 100 %. Ainsi même pour une situation idéale du point de vue du PMV (vote égal à 0) il y aura toujours des personnes insatisfaites. L'indice PPD est donc un pourcentage prévu de personnes insatisfaites à une sensation de confort thermique dans l'ambiance considérée en fonction du PMV. Ce pourcentage change du vote zéro vers les sensations chaude ou froide (Moujalled, 2007). L'intervalle du PPD varie de -1 à 1 ; il se calcule à partir de l'indice PMV mais il peut être retrouvé grâce à la courbe présentée sur la Figure II.9 On considère donc une situation d'inconfort dès que ce pourcentage est supérieur à 10 %.

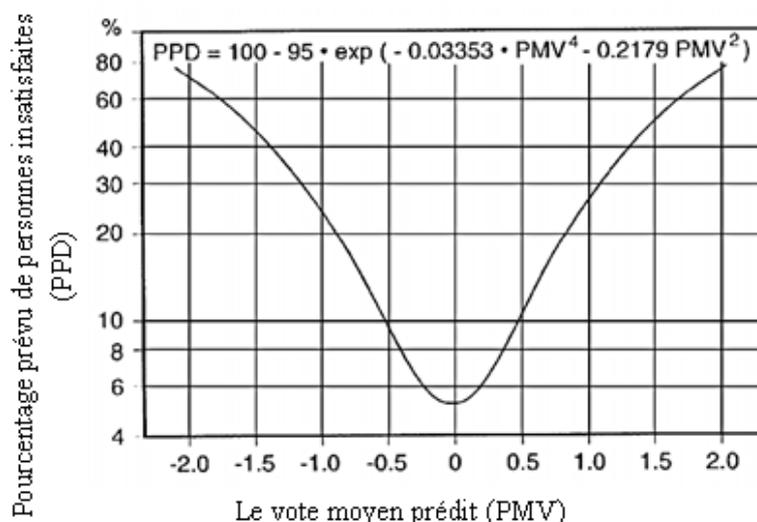


Figure II. 9 : Relation entre le PMV et le PPD. Source: (Robillart, 2015)

Ce modèle a été intégré dans les réglementations européennes (ISO 7730) et américaines (ASHRAE Standard 55). Mais il comporte des limites. En effet, tout d'abord, il ne peut être utilisé que dans des intervalles restreints. De plus, des études ont montré que dans les bâtiments à ventilation naturelle, l'indice PMV surestime la sensation de chaleur en été et la sous-estime en hiver. Ce modèle ne parvient donc pas à déterminer les situations de confort dans ces conditions. Il reste cependant valide pour les bâtiments climatisés.

II.2.3.1.2 Modèle à deux nœuds de Gagge

Contrairement au modèle statique de Fanger, Gagge a conçu une version dynamique qui simplifie celui développé par Stolwijk et Hardy pour la NASA. Dans ce modèle, la thermorégulation du corps humain a été divisée en deux nœuds : le centre du corps (le noyau) et la peau. Il permet de prévoir les variables physiologiques sous des conditions instationnaires (Cantin et al., 2005). Les sorties du modèle (les températures cutanées et internes, mouillure cutanée) sont utilisées pour calculer l'indice de température standard effective (SET). Ce dernier est un indice de confort thermique intégrant l'effet des six paramètres de base, et applicable dans des conditions transitoires chaudes, modérées ou froides. Les sensations thermiques peuvent être déduites des différentes valeurs de SET à partir du Tableau II.4 (Moujalled, 2007).

Tableau II. 4 : La relation entre les valeurs SET et la sensation thermique. Source: (Moujalled, 2007)

SET (°C)	Sensation	L'état physiologique d'une personne sédentaire
>37.5	Extrêmement chaud, très inconfortable	Echec de la régulation
34.5-37.5	Très chaud, très inacceptable	Sudation profuse
30.0-34.5	Chaud, inconfortable, inacceptable	Sudation
25.6-30.0	Légèrement chaud, légèrement inacceptable	Sudation légère, vasodilatation
22.2-25.6	Confortable et acceptable	Neutralité
17.5-22.2	Légèrement froid, légèrement inacceptable	Vasoconstriction
14.5-17.5	Froid et inacceptable	Refroidissement ralenti du corps
10.0-14.5	Très froid, très inacceptable	Frissons

II.2.3.2 Approche adaptative

Contrairement à l'approche analytique qui cherche à prédire l'état thermique du corps humain en chambres climatiques, les méthodes adaptatives prennent en compte les facteurs physiques, physiologiques et psychologiques et ont été établies d'après des enquêtes et des études menées sur le terrain et des investigations conduites in situ. Elles se basent sur le fait que l'être humain

n'est jamais passif face à un environnement thermique donné. Il reçoit des informations thermiques des différents capteurs situés sur le corps et réagit en conséquence pour trouver sa température de confort. De fait, le confort adaptatif est particulièrement utilisée dans les bâtiments résidentiels dans lesquels les habitants s'adapteront (habillement, posture, métabolisme, activité, etc.) aux variations climatiques s'ils en ont les moyens avec notamment un accès libre aux ouvrants. Dans un logement réel et naturellement ventilé, les conditions de confort sont alors plus larges et dépendent principalement de la température extérieure.

Les méthodes adaptatives ne prévoient pas une réponse de confort mais plutôt les conditions presque constantes dans lesquelles les gens vont probablement être dans une situation de confort. Il s'agit de construire une large base de données sur les conditions thermiques qui règnent dans différents types de bâtiment, pour différents climats et régions, par la mesure des grandeurs physiques de l'ambiance thermique. Ces mesures s'accompagnent de la réaction subjective des occupants sur la qualité de l'environnement thermique. Lors de la mesure, l'occupant utilise l'échelle ASHRAE pour indiquer sa sensation thermique (tableau II.4). Ensuite, la base de données est analysée à l'aide de méthodes statistiques pour déterminer la combinaison de températures ou de variables (température, humidité et vitesse de l'air) que les occupants considèrent comme neutres ou confortables, de sorte que cette base permettra de déterminer les conditions de confort thermique se produisant dans d'autres bâtiments soumis à des conditions similaires (Cantin et al., 2005).

L'adaptation est apparue lorsque les modèles statiques de PMV surestimaient l'inconfort des occupants dans des conditions chaudes et des bâtiments inconditionnels. La plage de confort prévue ne correspondait pas toujours au niveau de confort perçu par l'occupant, la gamme de confort dans les bâtiments non climatisés est plus grande que celle des bâtiments climatisés. En fait, la plage du confort thermique dans la méthode adaptative est plus large que celle offerte par les outils de la méthode d'analyse, car les gens s'adaptaient pour être à l'aise.

Le modèle a été simplifié ces derniers temps dans l'ASHRAE (S. ASHRAE, 2017). Ainsi, Hoyt and Cbe (2017) ont créé un modèle de confort adaptatif valable pour les bâtiments à ventilation naturelle, ils ont défini la zone de confort thermique par un diagramme présentant la relation entre les températures extérieures et les températures opératives intérieures (Figure II.10). Les deux zones colorées indiquent le taux de satisfaction à 80% pour la couleur claire, et 90% pour la couleur foncée.

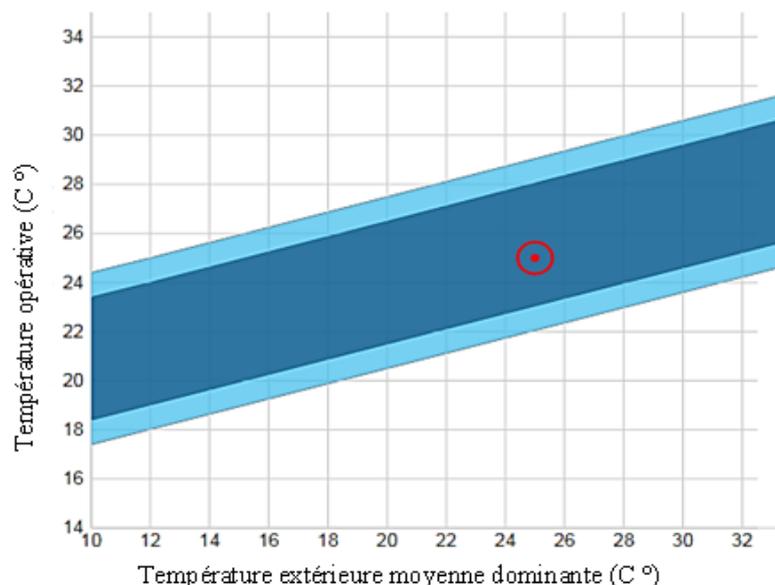


Figure II. 10: Diagramme de modèle adaptative selon la Norme ASHRAE 55-2017. Source : (<https://comfort.cbe.berkeley.edu>, Consulté le 24/01/2021)

Dans l'environnement thermique, les personnes répondent par un ensemble de réactions de différentes natures constituent la base du système adaptatif, trois catégories d'adaptation ont été identifiées selon leurs natures : comportementales (physiques), physiologiques et psychologiques. Ces mécanismes adaptatifs se traduisent par des boucles rétroactives (Figure II.11) qui représentent les interactions dynamiques et multidisciplinaires entre l'homme et son environnement.

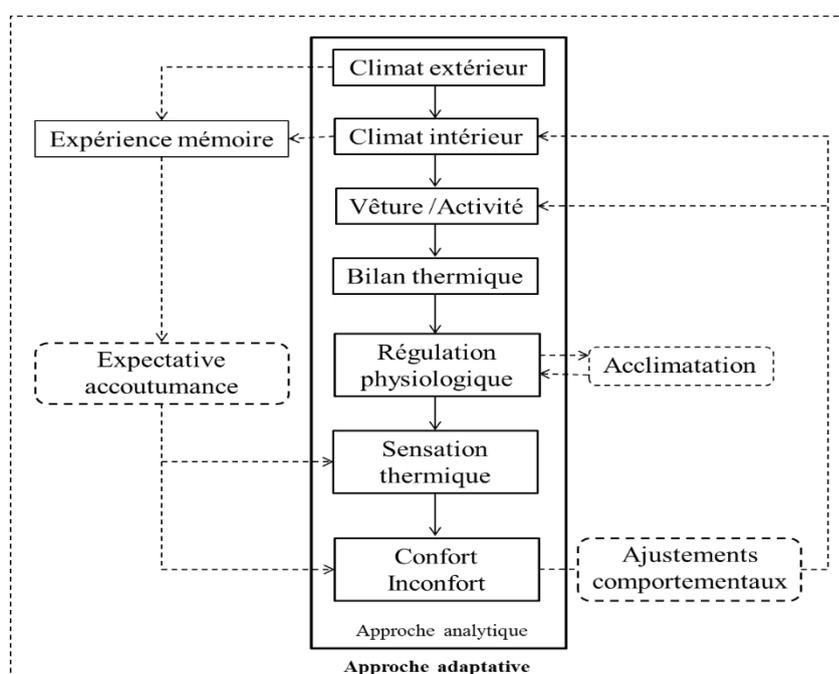


Figure II. 11 : Mécanismes de l'approche adaptative. Source: (Moujelled, 2007).

Moujalled (2007) a présenté en détail les mécanismes adaptatifs qui expliquent les différentes réponses humains. La boucle comportementale ‘ajustement’ joue un rôle important dans l’acceptabilité environnementale et le maintien du confort thermique. Ils dépendent de nombreux facteurs contextuels ‘architecture, climat, culture, société’, qui peuvent être limités dépend les circonstances. La boucle physiologique ‘acclimatation’ correspond à une réduction de la réponse humaine aux mouvements, aux vibrations ou aux chocs dus à une exposition accumulée ou répétée. La boucle psychologique ‘accoutumance et expectative’ recouvre les aspects cognitifs et culturels de l’adaptation à travers le concept de l’accoutumance et de l’expectative qui peuvent influencer la perception thermique.

Tous ces paramètres jouent un rôle important dans la procédure d’adaptation, et qui explique les écarts obtenus dans les études in situ entre le confort prévu par les indices rationnels et le confort réel surtout dans les bâtiments à ventilation naturelle.

II.2.4 Normes du confort thermique

Il existe plusieurs normes et standards ainsi que des rapports techniques qui spécifient des critères de confort thermique et de qualité de l’air. Plusieurs normes telles que ISO 7730, CEN 15251 et ASHRAE Standard 55, sont classés en divers catégories en fonction du type d’ambiance (modérée, chaude, et froide), et selon le type d’application (évaluation globale, ou bien support de calcul). Ces normes spécifient différents types et catégories de critères qui peuvent avoir une influence significative sur la demande d’énergie. Pour l’ambiance thermique, des critères pour la saison de chauffage (saison froide/hiver) et pour la saison de rafraîchissement (saison chaude/été) sont énumérés. A l’échelle Européenne, on distingue au total 18 standards exclusivement dédiés au confort thermique (Allab, 2017)..

II.2.4.1 Norme ISO 7730

La norme ISO 7730 (International Standard Organisation) est une norme mondiale utilisée pour l’estimation de la sensation générale de confort et l’inconfort thermique des personnes exposées à des conditions acceptables à l’intérieur des bâtiments (Zare et al., 2018).

Elle propose une évaluation de l’ambiance thermique en se basant sur la méthode analytique de Fanger qui se réfère à l’indice PMV /PPD fixant des catégories de confort en fonction du type de bâtiment et d’occupation, et impliquant l’influence des 6 paramètres environnementaux. Cette méthode analytique a été introduite dans la norme fixe des plages de valeurs pour les six

paramètres pour le calcul du PMV: le métabolisme de 46 à 232 W/m² (0.8 met à 4 met), la résistance thermique des vêtements de 0 à 0.310 m²·K/W (0 clo - 2 clo), la température de l'air de 10 à 30 °C, la température moyenne radiante de 10 à 40 °C, la vitesse relative de l'air de 0 à 1 m/s, et finalement la pression de vapeur partielle de 0 à 2 700 Pa (Allab, 2017).

La zone de confort prédite par la norme ISO 7730 admet un PMV acceptable devant être entre -0.5 < PMV < 0.5, soit 10% PPD. Elle indique la température de référence qui doit être maintenue en été et en hiver dans le bâtiment selon le niveau d'habillement, le niveau d'activité qui est inférieur à 1.2 met, et le taux d'humidité 40% < HR < 60% (Belkhouane et al., 2017), comme le suggère le Tableau II.5.

Tableau II. 5 : Températures opératives recommandées selon la norme ISO7730. Source : (Belkhouane et al., 2017)

Saison	Isolation des vêtements (clo)	Niveau d'activité (met)	température opérative optimale (C °)	Plage de température opérative (C°)
hiver	1.0	1.2	22	20-24
été	0.5	1.2	24.5	23-26

Notons que la norme ISO 7730 est applicable pour bâtiments déconnectés de l'environnement extérieur et avec un système de chauffage, de climatisation et de ventilation mécanique actif. En effet, des réserves ont été émises sur les limites du PMV dans les bâtiments naturellement ventilés, ainsi que plusieurs points critiques sur la validité du modèle utilisé, l'expression des températures de confort ainsi que son application sur différents types de bâtiments et de climats (Allab, 2017).

II.2.4.2 Norme CEN 15251

La norme EN 15251 fournie par le CEN (Comité Européen de Standardisation) définit une température intérieure de confort (T opérative) qui se calcule pour chaque jour et qui est calculée à partir de la température moyenne journalière glissante sur sept jours. La plupart des normes ISO, incluent des théories statique et adaptative dans l'évaluation de la qualité environnementale intérieure (QEI) en plus de la qualité de l'air, du confort visuel et acoustique. Elle intègre une évolution dans l'évaluation du confort thermique en se basant sur l'EN ISO

7730 pour les bâtiments climatisés, et en intégrant des algorithmes de confort adaptatif provenant du projet SCATs pour le confort d'été dans les bâtiments naturellement ventilés.

Les normes ISO7730 et EN15251 spécifient des catégories de confort similaires en fonction du type de bâtiment et d'occupation (tableau I.6). La norme EN ISO 7730 a une classification A, B et C équivalente à I, II, III dans la l'EN 15251 respectivement, sauf que l'EN 15251 qui comprend un groupe supplémentaire (IV) indiquant les conditions de confort acceptables ou acceptables pour une partie limitée de l'année (Allab, 2017).

Tableau II. 6 : Catégories de confort thermique selon l'EN ISO 7730 et l'EN 15251. Source: (Allab, 2017)

EN 15251	EN ISO 7730	Explications
I	A	<ul style="list-style-type: none">Niveau élevé attendu qui est recommandé pour les espaces occupés par des personnes très sensibles et fragiles avec des exigences spécifiques comme des personnes handicapées, malades, de très jeunes enfants et des personnes âgées.
II	B	<ul style="list-style-type: none">Niveau normal attendu qu'il convient d'utiliser pour les bâtiments neufs et les rénovations.
III	C	<ul style="list-style-type: none">Niveau modéré acceptable attendu qui peut être utilisé dans les bâtiments existants.
IV	Non considérée	<ul style="list-style-type: none">Valeurs en dehors des critères des catégories ci-dessus, Il convient que cette catégorie soit acceptée seulement pour une partie restreinte de l'année.

II.2.4.3 ASHRAE Standard 55

A l'échelle mondiale, c'est la norme est la plus utilisée, elle est établie par l'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) une société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation. La norme détermine les conditions environnementales intérieures pour atteindre un confort thermique acceptable pour les occupants des bâtiments, elle a été publiée pour la première fois en 1966 et, depuis 2004, elle est mise à jour tous les trois à six ans¹.

¹ Définition ASHRAE 55 source : https://en.wikipedia.org/wiki/ASHRAE_55, consulté le 29/04/2020

Cette norme est basée principalement sur le modèle PMV et traduit les conditions de confort à travers un graphe psychrométrique qui indique les températures opératives en supposant un taux de satisfaction de 80 % calculé par le modèle PMV-PPD, des vitesses de l'air inférieures à 0.2 m/s avec un habillement de 0.5 clo en été et 1 clo en hiver. ASHRAE 55 assure l'intégration du confort adaptatif pour les bâtiments à ventilation naturelle basée sur l'algorithme développé dans le cadre du projet RP884. Cependant, son utilisation est limitée dans les bâtiments sans climatisation ni ventilation mécanique; le système de chauffage est éteint, le métabolisme est compris entre 1 et 1.3, la résistance thermique des vêtements est comprise entre 0.5 clo et 1 clo, et enfin la température extérieure (moyenne journalière) est exclusivement comprise entre 10 °C et 33 °C (Allab, 2017).

II.3 Performance thermique des établissements scolaires

Il est largement reconnu que les systèmes éducatifs du monde entier se basent sur différentes étapes d'apprentissage où l'élève passe des périodes plus ou moins longues à apprendre en fonction de son âge. Les élèves âgés de deux ans à 20 ans passent une grande partie de leurs temps dans les établissements scolaires (Singh et al., 2018). De ce point de vue, assurer des conditions thermiques favorables dans les établissements scolaires devrait être une priorité afin d'optimiser l'assimilation des élèves et l'efficacité des enseignants. Or, pour disposer de lieux d'enseignement thermiquement confortables, il faut maîtriser les paramètres physiques influant le confort thermique, notamment, la température, l'humidité et la vitesse de l'air. Ces paramètres peuvent être modulés par une architecture soucieuse de son environnement.

Ici, il faut rappeler que la performance thermique du bâtiment est intrinsèquement liée à la capacité de l'enveloppe à contrôler de manière passive les échanges de chaleur qui s'effectuent à travers les parois horizontales et verticales du bâtiment. L'intensité de ses échanges dépend des propriétés thermo-physiques des matériaux, du ratio d'ouvertures, du facteur d'ombrage, de l'orientation, etc.

II.3.1 Impact de l'inconfort thermique sur les élèves

La salle de classe est le lieu où les apprenants et les éducateurs se rassemblent pendant de longues périodes pour participer à l'activité d'apprentissage. Dans ce lieu, l'élève est tenu de se concentrer au plus haut niveau car il apprend continuellement de nouveaux sujets, améliorant ses compétences et sa capacité de réflexion systématique. L'environnement créé au cours de cette activité est considéré comme un élément stimulant de la performance des élèves, et par

conséquent, il devrait avoir les caractéristiques qui favorisent le processus de l'éducation (Puteh et al., 2012).

L'environnement thermique caractérisant les espaces scolaires affecte la santé et le confort des apprenants en bas âge. En effet, les enfants sont plus sensibles aux augmentations de températures que les adultes, et ce, en raison de leur température corporelle plus élevée et de leurs capacités de thermorégulation moins développées (Singh et al., 2018). Le confort thermique dans les salles de classe a été largement étudié ces dernières années, en utilisant des approches variées et en se concentrant sur différentes zones climatiques et niveaux d'enseignement (Zomorodian et al., 2016). Certaines de ces études ont porté sur la relation qui pourrait exister entre la performance d'apprentissage et les conditions environnementales, notamment thermique, des lieux d'enseignement.

Ainsi, les investigations des chercheurs sur les résultats des élèves ont confirmé que les conditions thermiques peuvent affecter la santé des utilisateurs du bâtiment et que les situations défavorables peuvent provoquer de l'apathie, voire du stress, et avoir un impact sur les performances scolaires (Wargocki & Wyon, 2007). Zeiler and Boxem (2009) ont indiqué que les températures élevées (ambiance chaude) réduisent les performances, tandis que les températures basses (ambiance froide) réduisent la ductilité manuelle et la vitesse d'exécution des tâches. Ils ont également mentionné une autre étude qui a démontré qu'à mesure que la température et l'humidité augmentent, les élèves signalent plus d'inconfort et que leurs résultats et leurs performances s'affaiblissent à mesure que leur durée d'attention diminue (Zeiler & Boxem, 2009).

D'après Déoux (2019), l'équilibre thermique de l'enfant diffère de celui d'un adulte du fait que le rapport de la surface corporelle sur le poids est plus élevé ; ceci entraîne une augmentation des échanges par conduction, convection et rayonnement, avec un débit deux fois plus faible des glandes sudoripares, ce qui limite les pertes de chaleur par transpiration. Les effets des températures élevées sont physiologiques (fatigue, somnolence, céphalées, etc), respiratoires (augmentation des émissions de polluants dans l'air dues à la chaleur), et cognitifs (performances diminuées pour le calcul et la lecture sachant que ces résultats sont valables pour les climat tempérés et restent à vérifier pour d'autres types de climats).

II.3.2 Confort thermique dans les salles de classe

De nombreuses études publiées depuis les années 1960 suggèrent une forte corrélation entre les environnements thermiques et la qualité de l'air dans les salles de classe et les performances et le bien-être des élèves. La revue de la littérature faite par Zomorodian et al. (2016) indique l'absence de norme traitant spécifiquement de l'environnement thermique intérieur des bâtiments scolaires et des salles de classe pour les élèves d'âges différents à différents stades de leur formation, ce qui oblige les concepteurs et les architectes à utiliser les normes existantes telles que ASHRAE 55, CEN 15251, ISO-7730 comme documents de référence.

La communauté du confort thermique est bien consciente que la base de données de la norme ASHRAE-55, ISO 7730 et CEN 15251 se compose principalement de données collectées lors d'études de confort menées sur des adultes en bonne santé dans des bâtiments publics du monde entier. Ce qui implique que les architectes et les ingénieurs traitent la conception des écoles de la même manière qu'ils le font pour la conception de tout autre édifice public. Comme mentionné par Singh et al. (2018), il n'existe actuellement aucun texte réglementaire qui spécifie une température minimale ou maximale pour les salles de classe. Seuls quelques décrets élaborés à la suite du choc pétrolier des années 1970 ont fixé la limite supérieure de chauffage pour tous les bâtiments, y compris les écoles, à 20 degrés Celsius (décret du 3 décembre 1974), puis 19 degrés Celsius (décret du 22 octobre 1979). D'après Auliciems (1969), les recommandations de température idéale en classe reposent principalement sur la prise en compte du taux métabolique des enfants, qui est nettement supérieur à celui des adultes. En conséquence, les températures souhaitées devraient être nettement inférieures aux températures optimales pour les adultes.

La littérature sur le confort thermiques dans les établissements scolaires dans les zones chaudes et arides est peu abondante. Seulement 11 % des recherches examinées par Zomorodian et al. (2016) ont été menées dans des régions semi-arides et arides, qui comprennent des conditions chaudes et sèches, telles que celles regnant en Australie, en Iran, au Koweït et au Pakistan. De plus, selon la classification de (Singh et al., 2018) basée sur le volume des recherches effectuées pour chaque zone climatique, qui ont couvert 81 publications traitant le confort thermique dans les salles de classe, les climats chauds et secs représentaient moins de 10 % du total des études évaluées comme illustré dans la (Figure II.12).

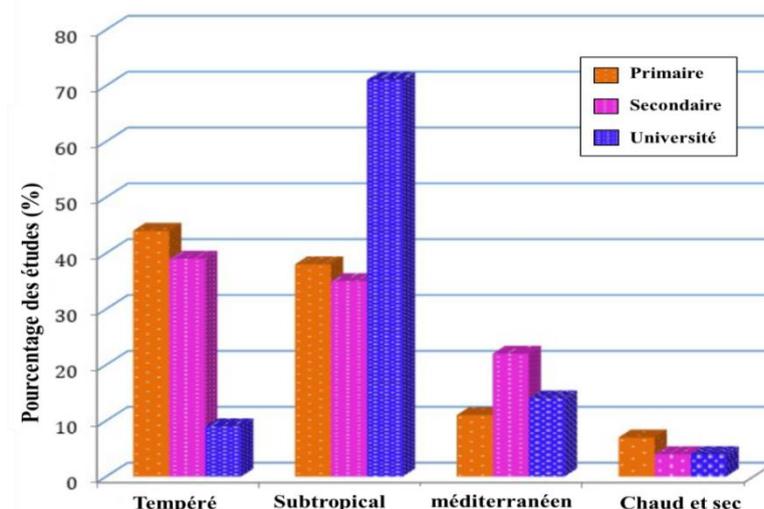


Figure II. 12 : Pourcentage des recherches effectuées sur le confort thermique dans chaque type de climat. Source: (Singh et al., 2018)

Dans des études menées sur le confort thermique des élèves dans des écoles tropicales ventilées naturellement, la température de neutralité a été trouvée comprise entre 28.2 et 29.1°C, ce qui est supérieur à la température établie par ISO 7730 et ASHRAE 55. L'acclimatation peut aider à élever la température idéale pour l'apprentissage. Dans un bâtiment ventilé naturellement, les enfants seraient plus adaptables que les adultes (Déoux, 2019). Les critères d'ambiance thermique recommandés dans la norme NF EN 152515, qui s'applique aux bâtiments scolaires, ne sont pas les valeurs de température de l'air mais la température opérative. La température maximale recommandée pour le rafraîchissement des salles de classe pendant la saison estivale se situe entre 26 et 27 °C pendant une partie de l'année. La norme ISO 7730, qui ne s'applique qu'à certains types de lieux de travail, recommande une plage de température de 23 à 26 °C pendant l'été, ainsi que des vêtements plus légers (Déoux, 2019; Singh et al., 2018).

Conclusion

Le climat a un impact significatif sur l'être humain dans son environnement naturel et construit, ainsi que sur la façon dont il perçoit son environnement intérieur et extérieur. Le présent chapitre a discuté les classifications du climat et a mis en évidence les propriétés du climat chaud et sec. Ce dernier est principalement caractérisé par un ciel ensoleillé et clair toute l'année, des températures élevées en raison du rayonnement solaire intense, ce qui entraîne une très faible humidité relative, des précipitations rares et vents sableux. Le climat chaud et sec en Algérie a été présenté du point de vue de sa localisation et les deux zones climatiques: estivale (E3, E4 et E5) et hivernale (H3a, H3b et H3c) le concernant ont été mis en évidence. La

première section du chapitre est finalisée par une énumération des stratégies et principes de conception adaptés au climat chaud et sec qui visent à offrir des conditions confortables en réduisant les températures extrêmes et assurer une protection optimale contre le rayonnement solaire.

La deuxième partie du chapitre a été consacrée au confort thermique. La relation homme-environnement thermique a été abordée, et les exigences de confort thermique ont été mises en évidence. Les deux méthodes analytiques et adaptatives qui permettent d'évaluer le confort thermique ont été présentées, ainsi que les normes et standards les plus communs pour définir le confort thermique approprié, telles qu'ISO 7730, CEN 15251 et ASHRAE Standard 55. Ces normes spécifient différents types et catégories de critères qui peuvent avoir une influence significative sur la demande d'énergie. Pour l'ambiance thermique, des critères pour la saison de chauffage (saison froide/hiver) et pour la saison de rafraîchissement (saison chaude/été) sont énumérés. Finalement, la problématique du confort thermique dans les établissements scolaires, a été traitée en s'appuyant sur les exigences du climat chaud et sec. Une revue de la littérature a été faite montrant le rôle important joué par le confort thermique vis-à-vis de la performance des bâtiments scolaires. Dans les salles de classe, il a un impact considérable sur la température intérieure ainsi que sur la consommation d'énergie. En outre, un environnement thermique approprié contribue favorablement à améliorer le processus d'apprentissage. La revue de la littérature a également mis en exergue le manque d'études consacrées à cette thématique relativement aux zones climatiques chaudes et sèches.

***Chapitre III : Performance lumineuse
dans les espaces scolaires***

Introduction

La lumière naturelle est un enjeu majeur qu'il est impératif de prendre en considération dans le processus de la conception des bâtiments en général, et des bâtiments scolaires en particulier. Il est de plus en plus reconnu que la lumière du jour produit des effets positifs, à la fois physiologiques et psychologiques. De plus, l'exploitation de la lumière naturelle est le vecteur le plus évident d'économies d'énergie dans les bâtiments. Les évaluations environnementales de la conception des bâtiments confirment que la lumière du jour est un facteur important et doit être pleinement exploité.

Le présent chapitre définit les caractéristiques et les stratégies de l'éclairage naturel, ainsi que les différentes méthodes de mesure et de l'évaluation des ambiances lumineuses. La notion de confort visuel sera également traitée, ensuite les différentes normes relatives à l'éclairage et permettant d'estimer les niveaux d'éclairement seront présentées. En dernier lieu, le chapitre s'intéresse au confort visuel dans les salles de classe, il définit les standards et normes du confort lumineux et fournit des recommandations sur la qualité de l'éclairage pour les écoles; l'intégration de la lumière du jour et sa régulation dans les salles de classe.

III.1 Eclairage naturel

L'éclairage et l'architecture sont intrinsèquement liés. Tout au long de l'histoire de l'architecture, la lumière du jour a joué un rôle important dans l'éclairage des bâtiments. La lumière du jour est essentielle, non seulement pour la vision, mais aussi pour ses effets sur les personnes travaillant, vivant ou expérimentant l'environnement bâti. D'un point de vue biologique, la lumière du jour est un facteur essentiel à l'existence de toute vie.

L'interaction entre le bâtiment et la lumière produit un éclairage naturel. C'est un phénomène physique qui contribue à la relation entre l'intérieur et l'extérieur provoqué par la pénétration de la lumière à l'intérieur de l'espace construit à travers l'enveloppe, ainsi que par la réflexion de cette lumière par les matériaux qui composent le bâtiment (Kaba, 2012). Reinhart et al. (2006) ont défini l'éclairage par l'action d'illuminer l'intérieur d'un bâtiment avec la lumière, ils considèrent que cette notion est le plus souvent utilisée dans le contexte du bâtiment. En outre, la disponibilité de la lumière du jour et l'occupation du bâtiment se chevauchent de manière significative.

L'éclairage naturel relève à la fois de l'art et de la science ; il est un élément de conception en même temps qu'un système qui caractérise l'environnement. En tant qu'élément de conception, la lumière peut améliorer les aspects esthétiques et qualitatifs d'un bâtiment, pourvu que ce facteur fasse partie intégrante de la philosophie de conception. En tant que système environnemental, la prise en compte combinée de la conception et des objectifs du système environnemental fait partie du processus de conception du bâtiment connu sous le nom de synthèse de conception (Omar, 2008).

III.1.1 Impacts physiologiques et psychologiques de la lumière naturelle

Les avantages physiologiques et psychologiques de l'utilisation de la lumière naturelle sont de bonnes raisons en faveur de son utilisation. La lumière du jour augmente généralement la satisfaction des occupants en offrant un environnement plus sain et plus agréable. De ce point de vue, il semble que les humains réagissent mieux émotionnellement et physiquement sous la lumière naturelle, et que le bon fonctionnement du corps humains soit lié à la présence de ce facteur en termes de quantité et qualité (Omar, 2008).

En général, les effets physiologiques et psychologiques de la lumière du jour sur les humains sont multiples. Ainsi, la lumière du jour a un effet physiologique sur le système visuel, en même temps, que sur le rythme circadien. Selon les qualités d'éclairage, le rythme circadien et le système visuel réagissent différemment : cela inclut la quantité de lumière, le spectre lumineux, la distribution spatiale et la durée de la lumière (Piderit Moreno, 2011). Il convient également de noter que l'éclairage a un impact psychologique, en particulier sur notre système de perception, entraînant des changements de comportement social et des sautes d'humeur. Le message envoyé à notre cerveau détermine notre système de perception, qui est influencé par une variété de facteurs tels que le contexte culturel, la motivation, les préférences et les attentes, entre autres, et est unique à chaque individu. Par conséquent, comprendre l'environnement lumineux du point de vue de la perception est une tâche longue et compliquée (Boyce, 2003; Piderit Moreno, 2011).

Au fil du temps, l'éclairage naturel est devenu de plus en plus important dans les bâtiments, en partie parce qu'il a été lié à l'augmentation du bien-être et de la productivité des personnes aussi bien dans leurs espaces de vie que de travail. L'œil humain s'adapte facilement à la lumière du jour, et les fenêtres, en particulier, offrent aux occupants un sentiment de connexion avec l'extérieur (Omar, 2008). De plus, l'éclairage naturel permet d'améliorer le confort visuel des

occupants du bâtiment tout en réduisant la consommation énergétique globale du bâtiment. De ce point de vue, ce facteur environnemental a une importance cruciale dans l'achèvement de la construction durable, notamment à cause de son impact significatif sur l'efficacité énergétique de bâtiment, permettant à la fois une réduction de la demande d'éclairage artificiel et une réduction des gains internes de la structure (Piderit Moreno, 2011). D'après Omar (2008), l'éclairage peut affecter l'agencement fonctionnel des espaces, le confort visuel et thermique des occupants, la consommation d'énergie dans le bâtiment, ainsi que le type et l'utilisation de l'éclairage électrique et des systèmes de contrôle associés. Globalement, la lumière a un impact favorable sur la santé, le bonheur, le confort visuel et les performances des personnes. Mais, l'impact de l'éclairage sur la productivité reste discutable. L'avantage économique le plus important de l'éclairage naturel est le potentiel accru de productivité des travailleurs (Abdou, 1997).

Dans les milieux scolaires, les études ont montré que la lumière du jour contribue au bien-être des apprenants et des éducateurs (Lieberman, 1990) de même qu'elle contribue à augmenter la performance scolaire (Smiley, 1996). L'utilisation de la lumière du jour est considéré comme une technologie gratuite qui a un impact significatif sur les expériences éducatives des élèves ; si elle est utilisée de manière durable, il devient possible d'améliorer les conditions environnementales d'une salle de classe (Piderit Moreno, 2011). En effet, il a été démontré que la lumière du jour a un impact significatif sur le processus d'apprentissage et le comportement des élèves (Piderit Moreno, 2011). De plus, la lumière du matin avec une courte longueur d'onde (bleu) fournit plus de stimulation circadienne dans les salles de classe. Dans ce contexte, les études rapportent que les élèves qui ne sont pas exposés à la lumière du matin connaissent une phase circadienne tardive plus prononcée, ce qui peut entraîner des couchers tardifs, des troubles du sommeil, une privation de sommeil chronique, du stress et des sautes d'humeur (Leslie, 2010; Piderit Moreno, 2011).

III.1.2 Stratégie de la lumière naturelle

L'élaboration d'une stratégie d'éclairage naturel doit être considérée selon les trois composantes de la lumière de jour qui pénètre dans un espace, à savoir : 1) la lumière directe du ciel à travers les fenêtres, 2) la composante lumineuse réfléchiée sur les surfaces extérieures, et 3) la composante lumineuse réfléchiée sur les surfaces intérieures de l'espace. Pour ce faire, il faut capter la lumière naturelle et en même temps se protéger contre les rayons solaires indésirables. Ensuite, il s'agit de transmettre et bien distribuer la lumière à l'intérieur du bâtiment. Enfin, il

sera également nécessaire de contrôler la quantité de lumière afin d'éviter toute source de gêne visuelle (Daich, 2019).

En général, la stratégie de la lumière naturelle a pour but de répondre aux besoins des occupants en termes de confort visuel, et en même temps, réduire la consommation d'énergie en termes d'éclairage électrique (Scartezzini, 1994). Dans le climat chaud et sec, la stratégie d'éclairage varie d'une saison à l'autre. En hiver, on peut recourir à la stratégie d'éclairage utilisée dans les climats tempérés. Cependant, il y a un risque de surchauffe en été qu'il faut éviter (Daich, 2019).

III.1.2.1 Capter

C'est le fait de recueillir de la lumière de jour pour éclairer naturellement l'intérieur d'un bâtiment, ce qui nécessite de prendre en compte l'influence du type de ciel, du moment de l'année, de l'heure du jour, de l'orientation et de l'inclinaison de l'ouverture, ainsi que de l'environnement physique du bâtiment (bâtiments voisins, type de sol, végétation, etc.).

III.1.2.2 Protéger

Il existe de nombreux types de protections solaires ; ils sont classés de deux manières : en fonction de leur position (intérieur ou extérieur) ; et selon leur degré de mobilité (fixe ou mobile) ; ainsi il y a des protections permanentes et fixes (tels que : verres spéciaux, auvents...etc.) et des protections mobiles (tels que : stores extérieurs, volets...etc.).

III.1.2.3 Transmettre

La transmission de la lumière de jour vers un espace intérieur est déterminée par les caractéristiques de l'ouverture, telles que ses dimensions, sa forme, son emplacement et le matériau de transmission utilisé, ainsi que par les dimensions du local et son aménagement intérieur (Daich, 2011).

III.1.2.4 Distribuer

La distribution de la lumière naturelle vise à la focalisation de la lumière en un point précis, ou bien à la répartition uniforme de la lumière dans l'espace intérieur. Les facteurs impliqués sont : la géométrie du local, la répartition des ouvertures, les couleurs et les matériaux des parois, ainsi que les systèmes de distribution lumineuse (Daich, 2011).

III.1.2.5 Contrôler

Le contrôle de la lumière naturelle consiste à gérer la quantité et la distribution de la lumière dans un espace en fonction de la variation des conditions climatiques et des besoins des occupants. Le recours à des méthodes et de systèmes automatisés de gestion de l'éclairage permet une utilisation intelligente de l'éclairage dans le bâtiment. Le contrôle de l'éclairage naturel peut être divisé en trois catégories : soit par l'utilisation de systèmes d'éclairage naturel adaptables, tels que des éléments de contrôle amovibles ; soit par le zonage de l'installation d'éclairage artificiel en fonction de la lumière naturelle disponible ; soit enfin, par la régulation du flux des lampes en fonction de la présence de lumière naturelle (Daich, 2011).

III.1.3 Standards et normes d'éclairage dans les espaces intérieurs

La Commission Internationale de l'Éclairage (C.I.E.) est un organisme qui s'est consacré depuis 1987 à l'élaboration de références et standards ainsi qu'à la normalisation et l'unification internationale dans le domaine de l'éclairage. Les normes de base sont résumées ci-après (Cadiergues, 2012):

III.1.3.1 NF EN 12665 (novembre 2002)

Concerne la « Lumière et éclairage » et donne les « Termes de base et critères pour la spécification des exigences en éclairage ». La norme précitée clarifie les définitions d'éclairage utilisées, tels que (Flux lumineux, Intensité lumineuse, Luminance, Éclairement, Uniformité, Éblouissement, Rendu des couleurs, et Facteurs de transmission de la lumière.. etc.)

III.1.3.2 NF EN 12464-1 (juin 2003)

Elle est spécifique à « Lumière et éclairage - Éclairage des lieux de travail - Partie 1 : lieux de travail intérieur ». De ce point de vue, la norme européenne actuelle spécifie les exigences de quantité et de qualité d'éclairage, ainsi que les solutions d'éclairage, pour la grande majorité des lieux de travail occupés et leurs abords. De plus, des recommandations de bonnes pratiques d'éclairage sont fournies.

III.1.3.3 NF EN 15193 (novembre 2007)

Soit 'Performance énergétique des bâtiments - Exigences énergétiques pour l'éclairage'. La norme précise la méthodologie de calcul pour évaluer la quantité d'énergie utilisée pour l'éclairage intérieur d'un bâtiment. Elle inclut également des projets de référence pour établir les fondements des objectifs d'éclairage liés à l'énergie, et fournit un indicateur numérique des exigences d'éclairage liées à l'énergie. Elle peut être appliquée aux bâtiments existants ainsi qu'à la conception des bâtiments nouveaux ou rénovés.

III.1.3.4 NF EN 12193 (mars 2008)

Soit 'Lumière et éclairage - Éclairage des installations sportives'. Elle fournit des valeurs pour la conception et le contrôle de l'éclairage des installations sportives en termes de l'éclairement, d'uniformité, de l'éblouissement et de propriétés de couleur des sources lumineuses. Toutes les exigences sont considérées comme des exigences minimales. Elle précise également les limitations sur le placement des luminaires dans des applications spécifiques.

III.1.4 Normes d'éclairage dans les salles de classe

Les normes régissant l'éclairage des établissements scolaires varient d'un pays à l'autre. La majorité des établissements d'enseignement utilisent le niveau d'éclairement au niveau du plan de travail comme critère (Narboni, 2006). Cependant, la variété des espaces d'apprentissage disponibles selon le niveau d'enseignement (primaire, secondaire, universitaire, etc.) conduit à des exigences d'éclairage différentes, ainsi qu'à des niveaux d'éclairement spécifiques, dans le sens où les performances visuelles d'un enfant diffèrent de celles d'un adulte (Ben Cheikh, 2007).

Une revue des normes et des recommandations relatives aux valeurs d'éclairement des salles de classe a été effectuée. Les paramètres recommandés dans différents pays ont été synthétisés. La comparaison entre les niveaux d'éclairement exigés par différentes normes internationales a permis de conclure que la moyenne de niveau d'éclairement recommandé est environ 500 lux (Bendekkiche, 2017).

Le tableau III.1 montre les niveaux d'éclairement suggérés selon 5 normes. Des différences significatives sont remarquées. Il est important de noter que les chiffres d'éclairement affichés sont calculés pour un éclairage artificiel (Piderit Moreno, 2011).

En ce qui concerne les établissements scolaires en Algérie, le guide publié par le Ministère de l'Éducation Nationale mentionne les caractéristiques géométriques des classes, ainsi que

l'orientation et les indices de vitrage recommandés. Cependant, aucune information n'est fournie sur les exigences d'éclairage, telles que la luminosité, l'uniformité, etc. A cet égard, la réglementation algérienne est très pauvre par rapport aux réglementations étrangères. (Bendekkiche, 2017; Benharkat, 2006).

Tableau III. 1 : les niveaux d'éclairage suggérés selon 5 normes. Source :(Piderit Moreno, 2011)

tâches	Royaume-Uni	Australie	Finlande	européen EN 12464-1	IESNA
Générale	300- 500 lux	240 lux	150-300 lux	> 300 lux	Maximum 1500-2000 lux (\pm 150-200 fc) Minimum 300 lux (30fc)
Tableau	/	240 lux	300 -750 lux	> 500 lux	\pm 500 lux (45 fc)
Ordinateur	/	160 lux	150 -300 lux	50 lux	\pm 160 lux (15 fc)
Lecture	300 lux	320 lux	500 -1000 lux	> 500 lux	\pm 500 lux (45 fc)
Dessin	500 lux	600 lux	1000 -2000 lux	>500 lux	\pm 500 lux (45 fc)

III.2 Confort visuel

Le terme confort, dérivé du mot anglais 'comfort', fait référence à un ensemble de facteurs qui contribuent au confort physique et au bien-être, ainsi qu'à un sentiment de bien-être et de satisfaction. Roulet, expert en éclairage, le définit comme une sensation subjective basée sur un ensemble d'entrées (Kaba, 2012; Roulet, 1987). Plusieurs autres chercheurs se sont intéressés au confort visuel, ainsi, Bodart (2008) l'assimile à «un sentiment subjectif lié à la quantité, la répartition et la qualité de la lumière». Le confort visuel désigne, également, les conditions d'éclairage nécessaires pour accomplir une tâche visuelle précise sans piégeage (Kaba, 2012). En outre, il est possible de le définir comme l'absence de gêne qui pourrait causer des difficultés et une tension psychologique (Murdi, 2002).

D'après Veitch (1996), les caractéristiques générales de l'éclairage lié au confort visuel sont : la présence de la lumière du jour, l'éclairage et sa répartition, l'éblouissement, l'éclairage et son uniformité, scintillement des lampes, distribution spectrale de la lumière, le système d'éclairage, la possibilité d'avoir un contrôle individuel de l'éclairage (Piderit Moreno, 2011; Veitch & Newsham, 1996).

III.2.1 Méthodes de mesure et d'évaluation du confort visuel

Les chercheurs ont conçu un certain nombre d'indicateurs et de paramètres pour évaluer le confort visuel à l'intérieur d'un espace. La classification se base sur le caractère statique ou dynamique de la lumière. Les paramètres statistiques correspondent à des indicateurs calculés dans des conditions particulières et leur évaluation est indépendante du temps. Alors que, les indicateurs dynamiques sont basés sur le climat et se rapportent à des mesures qui reflètent la variation temporelle des conditions d'éclairage naturel en raison du temps, des saisons, de l'orientation spatiale, etc. (Iturra, 2011).

III.2.1.1 Paramètres Statiques

III.2.1.1.1 Éclairage (E)

L'indicateur le plus couramment utilisé est le niveau d'éclairage lumineux (*illuminance* en anglais), il décrit les performances d'un système d'éclairage en termes de quantité de lumière nécessaire pour effectuer une tâche, généralement sur le plan horizontal (appelé plan de travail). La photométrie définit l'éclairage lumineux comme la grandeur correspondant à la sensation humaine sur la manière dont une surface est éclairée. Pour qu'un objet qui ne produit pas de lumière par lui-même soit visible, il faut qu'il reçoive de la lumière. Plus il en reçoit, plus il est clair, et visible distinctement. De ce point de vue, l'éclairage en un point donné mesuré en lux (lx), se calcule comme le quotient du flux lumineux (Φ) reçu par un élément de surface, divisé par l'aire globale de la surface (S) usuellement par m² de surface. L'éclairage lumineux est la seule grandeur photométrique directement mesurable. On peut facilement le mesurer avec un luxmètre. Cependant, l'éclairage est dépendant du temps et doit être évalué pour de nombreux instants afin d'obtenir une image claire de la façon dont la lumière du jour est exploitée dans un espace intérieur. Selon plusieurs normes, l'éclairage moyen à assurer dans une salle de classe doit être supérieur à 300 lux, tandis que dans les laboratoires et les salles d'art - ainsi que sur les tableaux blancs - l'éclairage minimum requis est de 500 lux. La société d'ingénierie d'éclairage (IES) établit des niveaux d'éclairage recommandés en fonction du type d'espace, du type de travail visuel, de l'âge des occupants et d'autres facteurs (Fang, 2017).

III.2.1.1.2 Uniformité (I_U)

Ce paramètre statistique correspond au rapport de la valeur nette minimale et moyenne de l'éclairage. Il fournit une représentation visuelle de la répartition de la lumière du jour dans

une pièce. Sa valeur varie de 0 à 1, 1 étant la dispersion optimale et homogène de la lumière. En fonction du type d'éclairage naturel, certaines normes préconisent des valeurs comprises entre 0,3 et 0,7 (Iturra, 2011).

Selon la Norme Européenne EN 12464-1: 'éclairage intérieur des lieux de travail', la répartition lumineuse ou l'uniformité des niveaux d'éclairement (exprimée par l'indice d'uniformité I_u) est définie comme étant «le rapport entre l'éclairement minimum (E_{min}) et l'éclairement moyen (E_{moy}) observé dans la zone de travail».

$$I_u = E_{min} / E_{moy} \quad (\text{eq : III.1})$$

En règle générale, pour obtenir un éclairement uniforme, l'éclairement maximum (E_{max}) et l'éclairement minimum (E_{min}) relevés dans un local ne doivent pas s'écarter de plus du 1/6 de l'éclairement moyen (E_{moy}) (Benharkat, 2006).

III.2.1.1.3 Facteur de lumière du jour (FLJ ou DF)

Le facteur de lumière du jour (DF) (*Daylight Factor* en anglais), est une autre mesure statique et un concept facile à évaluer. C'est le rapport de l'éclairement intérieur (E_i) reçu en un point du plan de référence (souvent plan de travail situé à une hauteur de 0.75m), à l'éclairement extérieur (E_e) simultané sur une surface horizontale en site parfaitement dégagé. Le rayonnement du soleil direct est exclu de ce calcul. DF s'exprime en pourcentage (%) (Figure III.1). Le ciel couvert normalisé CIE doit être utilisé.

Cependant, le DF a des limites ; plusieurs chercheurs ont noté les inconvénients de cette métrique. En effet, le calcul de ce paramètre est basé sur un ciel couvert, il ne change pas en fonction des conditions climatiques. De plus, l'emplacement et l'orientation, de même que la fonction du bâtiment ne sont pas pris en compte ; ce qui signifie que de nombreux problèmes de lumière du jour ne peuvent pas être détectés (C. F. Reinhart et al., 2006).

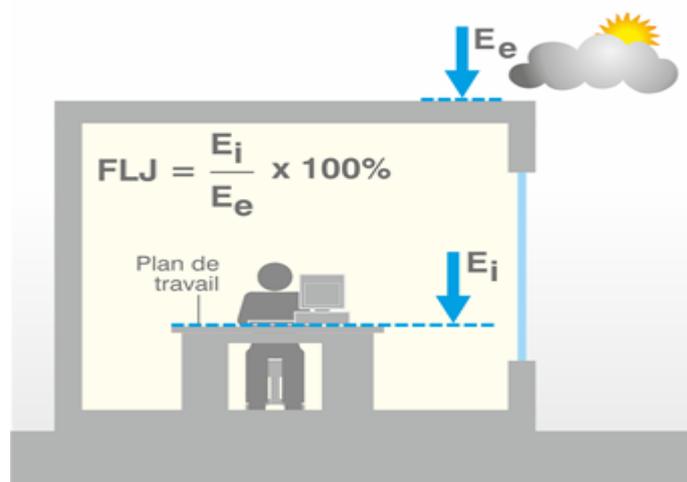


Figure III. 1 : Calcul du FLJ (DF). Source : (Benharkat, 2006)

Pour remédier à ces lacunes, plusieurs mesures ‘basées sur le climat’ (*climate based metrics* en anglais) ont été développées. Selon Futrell et al. (2015), la plupart des métriques d’éclairage naturel sont basées sur des valeurs horaires de lumière du jour (c'est-à-dire l'éclairement) calculées pendant les heures occupations à des points sur une grille d'une zone de lumière du jour à la hauteur du plan de travail, généralement 0.75m, et sont utilisées pour évaluer la disponibilité de la lumière du jour dans un espace (Futrell et al., 2015).

III.2.1.1.4 Éblouissement

L'éblouissement est un effet gênant causé par un contraste excessif des luminances dans le champ visuel (Serra & Coch, 2004). La luminance étant une grandeur correspondant à la sensation visuelle de luminosité d'une surface. Généralement, cet effet résulte de la différence significative de luminance entre une source de lumière vive ou une surface trop brillante et la focalisation visuelle dans un champ visuel avec une valeur moyenne beaucoup plus faible. On peut considérer que l'éblouissement est une forme de bruit visuel (Brandi, 2006).

D'après Iturra (2011) une première approche est recommandées pour éviter l'éblouissement correspond aux exigences des ratios de luminances (L_{max}/L_{min}). À cet égard, Serra & Coch (2004) recommandent une proportion de 1 à 3 entre la tâche visuelle et son fond proche, 1 à 5 avec la surface de travail général, et 1 à 10 avec des autres surfaces du champ de vision. Une deuxième approche, plus exacte, correspond à l'Index d'éblouissement qui fournit un indicateur quantitatif utile pour évaluer les contrastes de luminances et son impact sur le confort visuel.

III.2.1.1.5 Vue vers l'extérieur

Selon Farley and Veitch (2001), les gens préfèrent les espaces avec fenêtres, en particulier, les fenêtres avec vue sur un environnement naturel. Ceci souligne l'impact psychologique et physique important de la vue sur l'extérieur. Dans les établissements scolaires, la vue vers l'extérieur permet aux élèves de se détendre et de maintenir leur concentration sur une longue période de temps (Kaplan, 1995). De plus, des études ont démontré qu'une vue lointaine réduit la fatigue de l'œil après avoir réalisé une tâche visuelle rapprochée, telle que la lecture (Iturra, 2011; Mercier, 2009).

III.2.1.2 Paramètres dynamiques

En plus des paramètres statiques pour l'évaluation de la quantité de lumière dispensée et du confort visuel y afférant, d'autres mesures de la performance de l'éclairage naturel ont été récemment introduites, appelées '*climate based metrics*' en anglais soit littéralement en français 'mesures basées sur le climat'. Ces indicateurs de performance de l'éclairage naturel dérivent de calculs dynamiques sur une grande période de temps et sont basées sur les conditions variables réelles du ciel. De fait, ils offrent une meilleure évaluation de la performance de la lumière du jour tout au long de l'année et intègrent les différentes conditions météorologiques.

Ces paramètres considérés comme dynamiques sont de plus en plus utilisés par la communauté scientifique, et il est désormais largement admis que la méthode standard d'évaluation de l'éclairage naturel - le facteur de lumière du jour (FLJ)- doit être remplacée par des mesures calculées en fonction des conditions de soleil et de ciel obtenus à partir de fichiers climatiques standards et s'appuyant sur des prévisions de valeurs absolues de quantités de lumière couvrant une année complète. L'avantage fondamental des mesures dynamiques de performance de la lumière du jour par rapport aux métriques statiques est qu'elles prennent en compte la quantité et les caractéristiques des variations quotidiennes de la lumière du jour ainsi que les phénomènes climatiques irréguliers.

III.2.1.2.1 Autonomie de la lumière du jour (DA)

Parmi les paramètres d'évaluation des ambiances lumineuses, l'autonomie de la lumière du jour (DA) (*Daylight Autonomy* en anglais), est certainement le plus couramment utilisé. Ce paramètre représente le rapport exprimé en pourcentage entre le nombre d'heures dans une année où l'éclairement fourni par la lumière du jour en un point reste supérieur à un seuil

minimal d'éclairage requis, sur le nombre total des heures d'occupation. DA est une mesure dynamique basée sur des séries chronologiques d'éclairage qui sont dérivées des données annuelles de rayonnement solaire du site de bâtiment (C. F. Reinhart et al., 2006).

III.2.1.2.2 Éclairage utile à la lumière du jour (UDI)

L'éclairage utile de la lumière du jour (UDI) (*Useful Daylight Illuminance en anglais*) est le rapport entre le nombre d'heures dans l'année où l'éclairage fourni par la lumière du jour se situe dans une plage utile, sur le nombre total d'heures occupées dans une année (Nabil & Mardaljevic, 2005).

L'UDI qui est défini comme un pourcentage (%) est donc la fraction de temps dans une année où l'éclairage naturel horizontal intérieur en un point donné se situe dans une plage donnée. Il vise à déterminer le niveau de lumière du jour qui n'est ni trop sombre ni trop lumineux, et à éviter la probabilité d'inconfort visuel. Pour calculer l'UDI, on identifie généralement trois plages d'éclairage, en fixant un seuil d'éclairage inférieur et un seuil supérieur. La tranche supérieure représente le pourcentage de temps où l'éclairage est excessif, ce qui peut entraîner une gêne visuelle ; d'autre part, la tranche inférieure représente le pourcentage de temps où l'éclairage est insuffisant. Enfin, la case intermédiaire représente le pourcentage de temps où l'éclairage est approprié.

Selon la définition originale de l'UDI, les seuils inférieur et supérieur sont fixés respectivement à 100 lx et 2000 lx. Finalement l'UDI se mesure selon trois plages : UDI <100 lx, UDI 100-200 lx et UDI >2000 lx. La plage d'éclairage considérée comme utile est comprise entre 100 lux et 2000 lx pour un lieu de travail typique. Un éclairage inférieur à 100 lux est considéré comme trop sombre, et un éclairage supérieur à 2000 lux est considéré comme trop lumineux (Nabil & Mardaljevic, 2006).

Récemment, la plage suggérée entre 100 et 2000 lux a été révisée pour passer de 100 lux à 3000 lux (Mardaljevic, 2015). De plus des études ultérieures ont proposé de diviser la gamme intermédiaire UDI (100 -3000) lux en 100-300 et 300-3000 lux, qui sont respectivement appelés 'UDI supplémentaire' ($E < 300$ lux) et 'UDI autonome' ($E > 300$ lux) (Soleimani et al., 2021). Selon Mardaljevic, UDI (300-3000 lux) est la bande pour laquelle l'éclairage artificiel supplémentaire n'est probablement pas nécessaire.

III.2.1.2.3 Autonomie de jour continue (cDA)

L'autonomie de la lumière du jour continue (cDA) est similaire à l'autonomie de la lumière du jour (DA), mais elle donne un crédit partiel pendant les périodes où l'éclairement est inférieur à l'exigence minimale. Par exemple, l'éclairement minimal requis pour un espace est de 300 lux, tandis que l'éclairement à certain pas de temps est de 150 lux. Dans ce cas, il recevrait 0 crédit de DA et 0.5 crédit de cDA (Fang, 2017).

III.2.1.2.4 Autonomie Spatiale de Lumière du Jour (sDA)

L'autonomie spatiale de la lumière du jour (sDA) est une mesure en pourcentage qui évalue la suffisance de l'éclairement de la lumière du jour sur un plan de travail pendant les heures de l'occupation de l'espace sur une base annuelle. L'objectif est d'atteindre un éclairement lumineux de 300 lux pour au minimum 50% de temps d'occupation. C'est donc le pourcentage de la surface de plancher qui dépasse un niveau d'éclairement spécifié pendant un nombre d'heures annuelles déterminé (par exemple, 50 % des heures entre 08h00 et 18h00). Cette métrique prend en compte à la fois les aspects spatiaux et temporels des performances d'éclairage naturel (Heschong et al., 2012). Par conséquent, le sDA est une mesure zonale, c'est-à-dire qu'elle indique une seule valeur pour chaque pièce. Comme le sDA n'introduit pas de seuil supérieur pour l'éclairement naturel, son calcul doit être accompagné de l'évaluation de l'exposition annuelle au soleil (ASE).

III.2.1.2.5 Exposition annuelle au soleil (ASE)

L'exposition annuelle au soleil (ASE) est le pourcentage du plan de travail considérée (ou de la surface occupée) où l'éclairement solaire direct dépasse une certaine valeur (généralement, 1000 lux) pendant un nombre d'heures déterminé par an (généralement, 250). Lors du calcul de l'ASE, les stores et les protections solaires ne doivent pas être pris en compte. En général, sDA et ASE sont utilisés ensemble pour évaluer les conditions d'éclairage naturel de l'espace (Heschong et al., 2012). Cette métrique identifie les surfaces recevant trop de lumière directe du soleil qui peuvent causer un inconfort visuel (éblouissement) ou des coûts de refroidissement supplémentaires.

III.2.1.3 Modélisation de la lumière du jour basée sur le climat (CBDM)

Les mesures dynamiques de la lumière du jour basées sur le climat n'ont été introduites que récemment, mais leur utilisation est en constante augmentation. La plupart d'entre elles nécessitent de puissants outils de calculs informatiques. En effet, elles s'appuient sur les résultats de simulations devant traiter un grand nombre de variables d'entrée et donc des temps de calculs assez importants sont nécessaires.

De ce point de vue, la modélisation de la lumière du jour basée sur le climat (CBDM) (*Climate-based daylight modelling*) est une approche qui permet la prédiction de quantités de lumière naturelle (par exemple, l'éclairement, la luminance, etc.) en utilisant les conditions du soleil et du ciel fournies par les bases de données météorologiques standards. La modélisation dépend à la fois de l'emplacement (situation géographique) et des conditions météorologiques. Ainsi, la CBDM prend en considération les données climatiques spécifiques au lieu, ainsi que l'orientation du bâtiment (c'est-à-dire que l'effet d'éclairage du soleil et les conditions de ciel autres que le ciel couvert sont inclus), en plus de l'organisation du bâtiment et sa configuration.

Ainsi, la CBDM est généralement considéré comme une approche adaptée à toute évaluation fondée sur la totalité des données de lumière du jour relatives au lieu considéré pour une période d'une année complète. En pratique, cela signifie que les paramètres du soleil et du ciel sont dérivés des fichiers de données météorologiques standards qui contiennent des valeurs horaires pour une année.

III.2.2 Confort visuel dans les salles de classe

D'une manière générale, un environnement visuel confortable, donc favorable à l'exécution d'une tâche visuelle sera obtenu par (Benharkat, 2006) :

1. Un niveau d'éclairement suffisant.
2. Une répartition harmonieuse de la lumière.
3. L'absence d'éblouissement.
4. L'absence d'ombre gênante.
5. Un rendu de couleur correct.
6. Une teinte de lumière agréable.

Par ailleurs, la satisfaction de ces six exigences à la fois dans un même espace peut s'avérer difficile à réaliser. Des priorités sont donc à définir en fonction de la tâche visuelle à

accomplir dans cet espace. Considérant que les deux tâches visuelles principales effectuées dans les salles de classe sont la lecture et l'écriture, les exigences nécessaires pour établir un confort visuel optimum se réduisent principalement à : 1) un niveau d'éclairage suffisant, 2) une uniformité de l'éclairage ; 3) l'absence d'éblouissement et 4) un rendu de couleur correct. Par contre, la couleur de la lumière n'a pas beaucoup d'importance. Elle peut agrémente l'ambiance lumineuse dans ces locaux, mais n'a pas d'effet direct ou préjudiciable sur l'exécution des tâches visuelles des élèves et des enseignants (Benharkat, 2006).

En règle générale, on admet que le confort visuel dans les salles de classe est obtenu lorsque les objets environnants peuvent être vus clairement sans causer de fatigue visuelle. Le contenu du tableau blanc, le panneau d'information et le matériel d'apprentissage utilisé en classe doivent tous être visibles avec un éclairage approprié de la salle de classe (Piderit Moreno, 2011). Les espaces scolaires doivent être adaptés et adéquats aux tâches scolaires, ainsi qu'à la santé des élèves et des enseignants.

Selon Benharkat (2006), le caractère principal de la tâche visuelle dans les salles de cours consiste à alterner entre une vision rapprochée et une vision éloignée. En effet, l'élève écrit sur une table (vision rapprochée), regarde le tableau (vision éloignée), revient à son cahier (vision de près), observe son professeur (vision de loin). Ce qui implique des changements d'accommodation et de convergence mais aussi des changements d'adaptation rapides.

L'éclairage des salles idéal est corrélé au niveau de performance exigé avec le moins de fatigue pour l'œil ; ainsi, plus la difficulté de perception visuelle est élevée, plus le niveau d'éclairage doit être élevé. Les activités dans la salle de classe sont généralement structurées autour du tableau blanc ou des écrans de projection. Par conséquent, il est important de penser aux éclairages horizontaux par rapport aux plans de travail des élèves, ainsi qu'aux éclairages verticaux par rapport au tableau blanc ou aux écrans de projection (Piderit Moreno, 2011). Le tableau ci-dessous représente les éclairages recommandés par la norme EN 12464-1 pour les différentes tâches dans la salle de classe, ainsi que l'Indice d'éblouissement et l'Indice de rendu des couleurs.

Tableau III. 2 : Exigences de confort visuel dans les salles de classe. Source : (EN12464-1, 2002)

Taches	Eclairage E	Indice d'éblouissement unifié (UGR)	Indice de rendu des couleurs (CRI)
Générale	> 300 lux	19	80

Tableau	> 500 lux	19	80
Ordinateur	300 lux	19	80
Lecture	> 500 lux	19	80
Dessin	>500 lux	19	80

D'après le manuel d'éclairage de l'IESNA qui fournit des recommandations formalisées sur la qualité de l'éclairage pour les écoles; l'intégration de la lumière du jour et sa régulation, l'élimination des reflets et l'éblouissement direct, le scintillement, la répartition de la lumière sur les surfaces, et la répartition de la lumière sur le plan de travail sont les variables les plus pertinentes qui contribuent à un éclairage de bonne qualité dans les écoles. Ce guide définit la qualité de l'éclairage comme l'intégration des exigences humaines, de la conception, de l'économie et de l'environnement (IESNA, 2000).

Plusieurs études fournissent des preuves consistantes qui confirment l'importance de la lumière du jour dans la conception architecturale d'une salle de classe. En 1996, 1200 enfants de Caroline du Nord ont été examinés et il a été découvert que les élèves qui fréquentaient des écoles bien éclairées avaient de meilleurs résultats, allant de 5 % à 14 % de mieux, que les élèves qui fréquentaient des écoles mal éclairées (Nicklas & Bailey, 1996).

Selon Piderit Moreno (2011), une étude faite par Heschong-Mahome a permis de constater que les élèves qui travaillaient dans des espaces bénéficiant d'une lumière de jour adéquate, amélioreraient leurs scores en mathématiques et en lecture de 20 % et 26 %, respectivement. Ils ont également découvert que les élèves qui avaient de plus grandes fenêtres dans leurs salles de classe progressaient de 19% à 20% plus rapidement. De plus, les élèves qui avaient des fenêtres mobiles dans leurs salles de classe ont progressé entre 7 % et 8 % plus vite que les élèves qui ne pouvaient pas ouvrir leurs fenêtres. En outre, les chercheurs ont révélé que la mémoire à court terme fonctionne mieux entre 10h du matin et 6h du soir, ce qui a un impact positif sur la mémorisation et la concentration pendant les cours. Les enfants, en particulier, sont extrêmement sensibles aux fluctuations de la lumière du jour, il est donc essentiel de maintenir ce rythme et de l'adapter à l'horloge biologique normale du corps humain dans la salle de classe (Boubekri, 2007; Piderit Moreno, 2011).

Conclusion

L'éclairage naturel augmente généralement la satisfaction des occupants vis-à-vis de leur environnement en offrant un cadre plus sain et plus agréable. De ce point de vue, il semble que les humains réagissent mieux émotionnellement et physiquement sous la lumière naturelle. Un espace bien éclairé influe sur l'humeur, le comportement et le bien-être psychologique d'une part, et sur la productivité pendant l'exécution d'une tâche, d'autre part.

De nombreuses recherches menées sur l'éclairage intérieur des établissements scolaires ont confirmé que la présence de la lumière naturelle y est indispensable, particulièrement dans les salles de classe, où des effets très bénéfiques ont été enregistrés sur la performance des élèves et des enseignants. Une revue des normes et des recommandations relatives aux valeurs d'éclairement des salles de classe a été effectuée. Les paramètres recommandés dans différents pays ont été synthétisés. La comparaison entre les niveaux d'éclairement exigés par différentes normes internationales a permis de conclure que la moyenne de niveau d'éclairement recommandé est environ 500lux.

Toutefois, la présence de la lumière naturelle dans les salles de classe doit également assurer le confort visuel des utilisateurs, grâce à l'interaction de plusieurs facteurs. À ce titre, les chercheurs ont conçu un certain nombre d'indicateurs et de paramètres pour évaluer le confort visuel à l'intérieur d'un espace. La classification se base sur le caractère statique ou dynamique de la lumière. Les paramètres de mesures développés permettent de recueillir des informations sur tous les effets possibles de la lumière du jour.

En outre, la performance des espaces d'enseignement en matière d'éclairage étant tributaire de plusieurs aspects différents, une bonne maîtrise de la lumière du jour doit envisager l'utilisation de plusieurs paramètres de mesures différents, qui nécessitent d'être pris en compte lors de la phase de conception. À ce titre, les études consacrées au confort visuel ont montré que l'optimisation de la lumière du jour dans les salles de classe est une tâche très complexe, où plusieurs exigences différentes -et quelque peu contrastées- doivent être satisfaites, telles que des niveaux d'éclairement suffisants et bien répartis pour accomplir les tâches visuelles, la nécessité d'éviter l'éblouissement dû à la lumière directe du soleil, ou encore, la possibilité d'intégrer la lumière naturelle avec la contribution de systèmes d'éclairage artificiel.

Cependant, il existe plusieurs techniques et logiciels qui peuvent aider à concevoir un bon système d'éclairage qui s'adapte aux besoins d'éclairage, à la fois quantitatifs et qualitatifs, pour maintenir les occupants dans un état visuel confortable et un environnement lumineux performant.

*Chapitre IV : Ratio d'ouverture des
fenêtres des murs de la façade dans la
salle de classe*

Introduction

Assurer l'éclairage naturel est l'une des fonctions principales des fenêtres. Ce rôle primordial relève de la conception de la fenêtre qui détermine, également, la quantité et le mode de distribution de la lumière naturelle dans l'espace. Les rayons du soleil sont inextricablement liés à la lumière du jour. Dans certains cas, des gains solaires supplémentaires peuvent être bénéfiques en termes d'éclairage naturel ; dans d'autres, le gain de chaleur doit être contrôlé.

Le présent chapitre s'intéresse au ratio d'ouverture des murs de façade (WWR) relativement aux espaces d'enseignement. D'abord, un aperçu sur la fenêtre en tant qu'élément architectural est donné, en mettant en évidence son rôle de capteur de lumière et de rayons solaires, pour ensuite aborder son évolution au fil de temps. Les caractéristiques des fenêtres telles que la forme, l'orientation, l'emplacement, et les dimensions sont également examinées. Dans la deuxième section du chapitre, on mettra en évidence les moyens et stratégies pour optimiser les fonctions de la fenêtre en tant que modulateur environnemental. Ainsi, l'impact du type de vitrage et de la protection solaire, ainsi que leur rôle dans l'amélioration de l'efficacité de la fenêtre, seront traités. Une revue de la littérature sera, ensuite, consacrée à la notion du ratio d'ouverture du mur de façade comme l'un des paramètres clé de la conception de la fenêtre, notamment quand il s'agit des climats chaud et aride. L'impact du WWR sur le confort lumineux et thermique des utilisateurs dans les salles de classe, ainsi que sur la consommation énergétique du bâtiment éducatif, sera finalement traité.

IV.1 La fenêtre, un capteur de la lumière naturelle et de l'énergie solaire

Les éléments du bâtiment jouent un rôle majeur dans le processus de consommation d'énergie, mais l'enveloppe architecturale est la première responsable du transfert de chaleur de l'extérieur vers l'intérieur (Elghamry & Hassan, 2020). L'enveloppe est en contact direct avec l'environnement extérieur, et approximativement 75% des pertes et/ou gains de chaleur se produisent à travers la toiture et les parois verticales (façades) du bâtiment (Aydın & Mihlayanlar, 2020). De ce point de vue, les choix conceptuels concernant l'enveloppe doivent être bien réfléchis car une fois la forme et la matérialité du bâtiment déterminée, il est difficile d'apporter des modifications ultérieurement.

La fenêtre est un type particulier de composant de l'enveloppe et, précisément de la façade, avec un coefficient de transfert de chaleur global qui est normalement cinq fois plus élevé que celui des autres composants. Les ouvertures au niveau de l'enveloppe sont responsables

d'environ 40 % de la consommation énergétique globale d'un bâtiment (Lee et al., 2013; Sun et al., 2018). Par conséquent, la sélection d'une fenêtre à hautes performances lors de la phase de conception est essentielle.

Le terme 'fenêtres' désigne les ouvertures dans l'enveloppe d'un bâtiment qui permettent aux résidents de voir l'extérieur tout en offrant une lumière naturelle confortable pendant la journée ainsi qu'une aération assurant le renouvellement de l'air et/ou le rafraîchissement de l'espace. Cependant, la définition de la 'fenêtre' n'est pas limitée à une ouverture dans une enveloppe opaque. Les façades entièrement vitrées et à double peau sont des exemples d'innovations qui sortent du cadre de cette description. La fenêtre joue, également, une fonction essentielle dans l'aspect architectural du bâtiment (Sadineni et al., 2011). De plus, une bonne conception des fenêtres peut économiser de l'énergie pour un bâtiment et améliorer la qualité de l'environnement intérieur d'un espace (Samani et al., 2016). Par exemple, le principal inconvénient d'une fenêtre en verre simple est qu'elle ne peut pas fournir une résistance thermique suffisante et conduit généralement à une consommation d'énergie de refroidissement élevée en été (Lai et al., 2017).

La fenêtre est considérée comme l'élément fonctionnel le plus important de l'enveloppe en raison de son impact significatif sur le comportement thermique du bâtiment et implicitement sur la quantité d'énergie consommée (Elghamry & Hassan, 2020). D'après Batier (2016), l'action sur la fenêtre a un effet significatif sur la consommation d'énergie, le confort et la santé (qualité de l'air). Ces fonctions ont incité les architectes à concevoir des fenêtres plus grandes, plus esthétiques, durables, faciles à installer et, surtout, moins chères lors de la construction ou de la rénovation de structures.

Mercier (2009) voit que la fenêtre est un composante complexe et fondamentale des systèmes passifs de contrôle environnemental. C'est l'un des « outils » les plus importants qui permet à l'utilisateur de modifier la température, l'éclairage diurne, le mouvement d'air et l'acoustique pour améliorer son confort environnemental. D'après Benradouane & Benyoucef (2008), la fenêtre est l'un des éléments les plus compliqués et les plus coûteux d'un bâtiment bioclimatique en raison des nombreux rôles contradictoires qu'elle doit jouer : éclairant et occultant, regard vers l'extérieur et recherche d'intimité, pénétration et protection solaire, étanchéité et ventilation. En plus des exigences techniques pour le maintien du confort thermique et visuel ; la fenêtre entretient des échanges thermiques importants entre l'extérieur et l'intérieur, ainsi qu'avec les occupants. La température de la surface de la fenêtre, le rayonnement solaire et le

mouvement de l'air entrant par la fenêtre sont les principaux facteurs qui déterminent le confort thermique de l'occupant (Huizenga et al., 2006). D'autre part, la fenêtre fournit un éclairage naturel pour la pièce et une connexion visuelle entre la personne et l'environnement qui l'entoure.

La conception des fenêtres est donc un problème complexe à objectifs multiples. Ruck et al. (2000) ont décrit la fenêtre comme une variété de fonctions qui changent selon la situation et la conception, sachant que la fonction principale de la fenêtre est de fournir une vue sur le monde extérieur. La vue joue un rôle essentiel dans l'évaluation de l'environnement intérieur par l'occupant. La hauteur des yeux des utilisateurs de l'espace, le cadre, la taille et la position des fenêtres, et d'autres aspects de la façade doivent être soigneusement examinés.

Par ailleurs, l'amélioration de la performance thermiques et énergétique de la fenêtre ainsi que les exigences de l'éclairage naturel nécessitent l'intégration d'une étude complète prenant en compte tous les paramètres de la fenêtre, à savoir, la forme, les dimensions, et le ratio des fenêtres de la façade, afin de réduire la consommation d'énergie, améliorer les charges d'éclairage, et le confort thermique des utilisateurs (Elghamry & Hassan, 2020). La surface et la direction de la fenêtre, le type de verre, l'épaisseur, la couleur et le pourcentage du ciel visible déterminent la quantité maximale de lumière du jour qui peut être admise à travers la fenêtre (Brown & Dekay, 2000).

En voulant optimiser la conception des façades, Lee et al. (2013) se sont intéressés aux différents composants et propriétés matérielles de la fenêtre pour déterminer leur impact sur la consommation d'énergie des bâtiments pour le chauffage, la climatisation et l'éclairage dans cinq zones climatiques typiques en Chine. Les paramètres étudiés, concernaient le coefficient de transfert de chaleur (valeur U), le coefficient de gain de chaleur solaire (SHGC), la transmittance visible, et le ratio d'ouverture de la façade (taille des fenêtres). De nombreuses autres études ont évalué la contribution de différents matériaux de fenêtres pour les économies d'énergie ou la lumière naturelle (Bojić & Yik, 2007; Gasparella et al., 2011; Hassouneh et al., 2010; M. Singh & Garg, 2009).

IV.1.2 Évolution de la fenêtre

La fenêtre s'est développée au cours des siècles, mais son rôle de laisser entrer la lumière du jour est restée sa fonction première (D. Phillips, 2004). La fenêtre au Moyen Âge était constituée d'une série de panneaux entrouverts qui laissaient entrer la lumière par de simples

trous, qui pouvaient être obstrués par de petits vitraux constitués de verres simples comme les culs de bouteille, le parchemin tendu ou le papier huilé dans le cas les plus prestigieux (Chakali, 2019).

Pour répondre aux besoins de sécurité et de confort de l'époque, le XVe siècle voit la création de fenêtres spécifiquement destinées aux bâtiments civils, avec un design très différent du châssis utilisé dans les édifices religieux. Ceux-ci sont généralement constitués d'un cadre à deux battants et à trois croisés. Un volet entier va s'installer à l'intérieur dans les feuillures (Jacquier et al., 2012). Depuis le milieu du XVIIe siècle, les croix de pierre ont été progressivement remplacées par des meneaux en bois, et la production de verre à vitre s'est considérablement développée, les quadrillages ont pris la place des structures de vitraux.

La menuiserie des fenêtres a subi d'importantes modifications au XVIIIe siècle, entraînant une augmentation significative de l'étanchéité par la substitution des meneaux de bois par des fermetures à noix et gueule-de-loup, ainsi que l'introduction de la pièce d'appui et du renvoi d'eau. Les techniques de fabrication des fenêtres sont restées inchangées, jusqu'à l'arrivée des premières menuiseries industrielles dans la seconde moitié du XIXe siècle. Les fenêtres de cette période ont un vitrage simple ou double, avec une géométrie précise (cintre, anse de panier, etc.). Au début du XXe siècle, le verre de fabrication industrielle a rapidement remplacé le verre soufflé. Depuis les années 1960, ce procédé a été supplanté par le verre flotté, qui est parfaitement transparent et sans défaut (Chakali, 2019; Jacquier et al., 2012)..

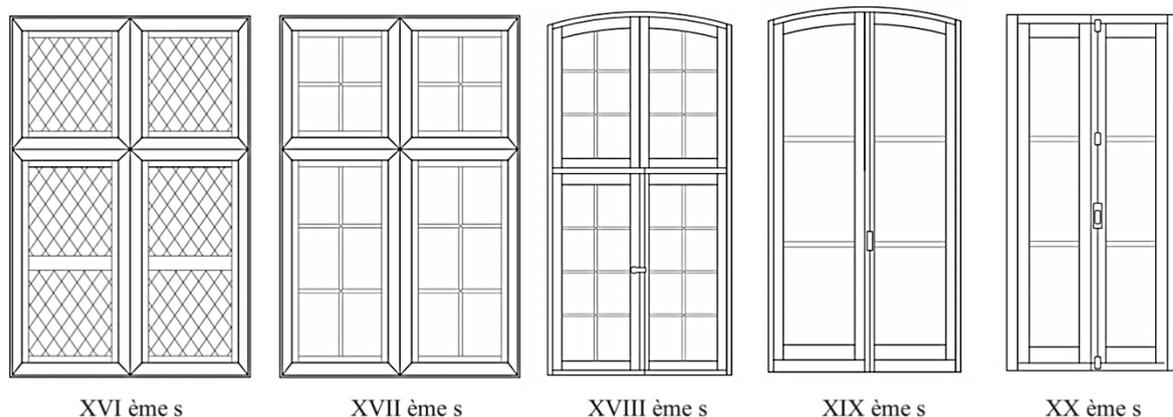


Figure IV. 1 : Evolution de la fenêtre. Source : (Jacquier et al., 2012)

IV.1.3 Caractéristiques de la fenêtre

Les fenêtres jouent un rôle important dans le confort thermique et visuel des utilisateurs, ainsi que dans l'efficacité énergétique du bâtiment. Il est important de rappeler que l'efficacité de la

fenêtre est principalement déterminée par ses caractéristiques, sa forme et ses dimensions ; de plus, les matériaux dont elle est faite sont des facteurs cruciaux pour quantifier la performance d'un bâtiment. Une sélection appropriée de l'orientation des fenêtres, la taille optimale de l'ouverture vitrée et l'application d'un système d'occultation peuvent réduire l'effet négatif du rayonnement solaire sur l'augmentation de la température de l'air intérieur (Nedhal Al-Tamimi et al., 2011). D'après Elghamry and Hassan (2020), les caractéristiques, dimensions, orientation et position des fenêtres dans la façade sont considérées comme les facteurs les plus importants influençant les performances des fenêtres et leur rôle tant en termes d'amélioration de la performance environnementale interne de l'architecture que de la quantité d'énergie consommée dans le bâtiment.

IV.1.3.1 Forme de la fenêtre

La forme de la fenêtre a un impact limitée sur la quantité de la lumière et d'énergie solaire qui pénètre dans un espace intérieur. Par contre, la façon dont la lumière et l'énergie solaire est distribuée varie en fonction de la forme de l'ouverture (Labreche, 2014).

La forme de la fenêtre la plus populaire est la forme carrée ou rectangulaire, suivie de la fenêtre cintrée, qui est une fenêtre de droite avec un rebord supérieur arrondi, la fenêtre arrondie ou œil de bœuf, et enfin la fenêtre triangulaire, qui est moins courante et trouve au niveau des toitures. D'autres formes incluent la fenêtre pleine cintre, la fenêtre en arc surbaissé, la fenêtre trapézoïdale, la fenêtre ovale, la fenêtre demi-lune...etc. (Chakali, 2019)..

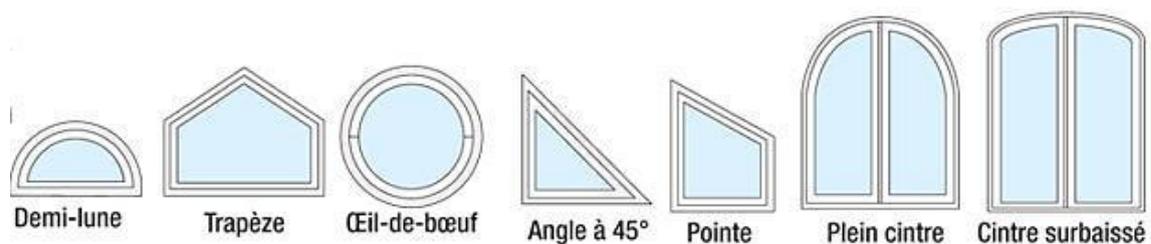


Figure IV. 2 : Formes des fenêtres. Source : (<https://www.systemed.fr>, consulté le 21//04/2020)

IV.1.3.2 Orientation de la fenêtre

Un facteur important dans la conception des fenêtres est l'orientation, qui fait référence à l'emplacement géographique du bâtiment et détermine la quantité d'énergie solaire et de lumière naturelle reçue (Bouchahm & Bourebia, 2010). L'orientation des fenêtres dans l'enveloppe du bâtiment affecte la quantité de ventilation naturelle et d'éclairage interne, mais surtout, la

quantité d'exposition au soleil, les performances thermiques du bâtiment et la quantité d'énergie consommée pour obtenir le refroidissement, le chauffage et l'éclairage requis (Elghamry & Hassan, 2020).

La sélection de l'orientation du bâtiment la plus optimale est l'une des décisions de conception éco-énergétiques critiques qui pourraient avoir un impact sur la performance énergétique de l'enveloppe du bâtiment, car elle peut être utilisée pour minimiser le rayonnement solaire direct dans les bâtiments à travers les fenêtres, les ouvertures du bâtiment ainsi que les murs opaques externes (Fadzil & Sia, 2004). Le choix de l'orientation est soumis à un certain nombre de facteurs, et il a un impact sur l'environnement intérieur en raison de deux facteurs climatiques: le rayonnement solaire et les problèmes de ventilation. L'orientation des fenêtres a un grand impact sur la température. Ainsi, les orientations vers l'Est et surtout l'Ouest sont à éviter en raison des augmentations de température au cours de l'après midi. La différence entre la pire et la meilleure orientation est de 2.20 °C, et l'orientation Nord permet une baisse de température de 0.5 °C par rapport à l'orientation Sud (Zekraoui, 2017).

La meilleure orientation est l'orientation Sud, car en hiver les fenêtres captent un maximum de rayonnement solaire, et l'entre-saison qu'en été lorsque le soleil est plus haut dans le ciel, il est plus facile de se protéger du soleil (Daich, 2011). D'autre part, la position des fenêtres par rapport à la direction principale du vent a un impact significatif sur la ventilation intérieure. Selon Givoni (1978), le besoin le plus important d'une ventilation adéquate est de prévoir des ouvertures à la fois sur les côtés 'au vent' et 'sous le vent' du bâtiment. Un débit d'air pénétrant à travers une fenêtre est plus efficace lorsque la direction du vent est inférieure à 30 degrés par rapport à la normale du plan de la fenêtre. Lorsque l'occultation est inefficace, la lumière du soleil brille directement à travers la fenêtre et réchauffe l'intérieur (Zekraoui, 2017).

Nedhal Al-Tamimi et al. (2011) rapportent les résultats d'une étude portant sur l'effet de l'orientation du bâtiment, du WWR, et de la ventilation naturelle sur les performances thermiques des bâtiments résidentiels dans les régions tropicales. Ils ont constaté que les fenêtres Est ont plus d'effet sur l'augmentation de la température de l'air intérieur que les fenêtres Ouest. De plus, le confort thermique peut être amélioré en appliquant une ventilation naturelle et un ratio fenêtre-mur (WWR) de 0.25.

IV.1.3.3 Emplacement de la fenêtre

La pénétration de la lumière naturelle dans l'espace est influencée par la position de l'ouverture dans le mur. Plus la fenêtre est haute, plus l'intérieur de la pièce est lumineux et plus la zone éclairée est profonde (Baker & Steemers, 2002; Reiter & De Herde, 2004). En ce qui concerne l'inclinaison de l'ouverture, il y a deux sortes d'ouvertures à considérer : latérales et zénithales. Ces deux formes d'ouverture réagissent différemment au rayonnement solaire qui pénètre. Pour capter au maximum le rayonnement solaire, une ouverture doit être perpendiculaire que possible aux rayons du soleil. Une ouverture horizontale couvre une plus grande partie du ciel qu'une fenêtre verticale et fournit ainsi une plus grande quantité de la lumière naturelle diffuse dans l'espace qu'elle éclaire. En outre, une fenêtre inclinée face au ciel, fournit une plus grande quantité de lumière diffuse qu'une fenêtre verticale (Daich, 2011).

Les ouvertures verticales ont des performances lumineuses nettement plus faibles que les ouvertures horizontales. En hiver, les baies latérales exposées au sud transmettent le plus de rayonnement solaire, favorisant l'utilisation des apports solaires tout en limitant les pénétrations et les surchauffes qu'elles provoquent (Reiter & De Herde, 2004). La localisation des fenêtres doit être considérée les facteurs suivants : le type de ciel, la course du soleil, les bâtiments environnants, le temps d'occupation de l'espace, le type d'activité, et les données climatiques de la région (Baker & Steemers, 2002; Reiter & De Herde, 2004).

La position de la fenêtre dans l'enveloppe du bâtiment détermine la quantité d'éclairage naturel et de la ventilation, en fonction de l'orientation et de la proportion de la fenêtre. Certaines études ont tenté de mesurer l'impact de la position de la fenêtre sur l'énergie consommée par le bâtiment. S. Kim et al., (2016) ont examiné l'impact de la conception de la fenêtre (taille, position et orientation) sur la consommation énergétique totale. Ils ont trouvé que la taille de la fenêtre est le facteur le plus influent qui doit être considéré lors de la phase de conception de la fenêtre, sachant que son impact sur la consommation d'énergie est maximale lorsque le rapport fenêtre/mur est 20%. La charge d'énergie est la plus faible lorsque toutes les fenêtres sont localisées sur la hauteur moyenne.

IV.1.3.4 Dimensions de la fenêtre

Les fenêtres sont chargées de permettre la pénétration de la lumière du jour dans le bâtiment. Cependant, comme elles peuvent être une source de gains ou de pertes de chaleur, elles ont également un impact sur la consommation d'énergie du bâtiment et peuvent affecter négativement les conditions thermiques intérieures. Compte tenu de leurs caractéristiques

matérielles, les surfaces vitrées telles que les fenêtres ont des coefficients de transfert thermique (valeur U) plus élevés que les éléments opaques de l'enveloppe (Amaral et al., 2016). Selon Lee et al. (2013), le coefficient de transfert de chaleur global (ou valeur U) des fenêtres est normalement cinq fois supérieur à celui des autres composants de l'enveloppe d'un bâtiment (par exemple, les murs, les portes, etc.), et environ 20 à 40 % de l'énergie dans un bâtiment est évacuée par les fenêtres. Si les fenêtres sont mal conçues, elles peuvent être responsables d'un inconfort visuel et thermique intérieur et d'une consommation d'énergie inutile dans un bâtiment. Une étude menée par Muhaisen & Dabboor (2013) a démontré que la consommation d'énergie n'est pas influencée par la forme verticale ou horizontale de la fenêtre ; cependant, elle est influencé par le rapport fenêtre-mur. Par conséquent, la surface vitrée (taille de la fenêtre) est une donnée importante pour la conception de bâtiments à faible consommation d'énergie.

Les dimensions de la fenêtre affectent les gains solaires et la quantité de lumière naturelle qui pénètrent dans la pièce, et par voie de conséquence, la consommation énergétique du bâtiment pour le chauffage, la climatisation, et l'éclairage artificiel. Pour augmenter la quantité de lumière naturelle incidente, il faut agir sur les moyens d'interaction avec l'extérieur en ajoutant des décrochements, des subdivisions, etc. Cependant, il faudra s'attendre à une augmentation équivalente en termes de gains ou de pertes de chaleur.

IV.2 Performances de la protection solaire

Avec l'apparition du vitrage de grand format et son utilisation dans le bâtiment avec des dimensions de plus en plus grandes, la transparence qui représente l'un des traits distinctifs de l'architecture moderne a été rendue possible. Progressivement, la façade a commencé à s'ouvrir et à se dématérialisée jusqu'à devenir un mur rideau (façade entièrement vitrée). Depuis son avènement au début du XXe siècle, la transparence ne cesse de susciter l'attrait et l'intérêt des architectes. Pourtant, les parois transparentes et les murs rideaux ont démontré leurs échecs sur le plan environnemental (excès de lumière, surchauffe et gaspillage d'énergie).

Pour contrecarrer ces contraintes, les architectes en collaboration avec les ingénieurs et les thermiciens ont élaboré des méthodes, des techniques et des dispositifs qui permettent de contrôler l'ensoleillement et ainsi profiter de ces avantages tout en atténuant ou en évitant ces effets néfastes à l'intérieur d'un bâtiment. De ce point de vue, les occultations solaires compte parmi les innovations architecturales destinée à filtrer et contrôler le rayonnement solaire pénétrant dans le bâtiment (Grynning et al., 2014). Aujourd'hui, la protection solaire est un

élément clé dans la conception des bâtiments durables. Elle est considérée comme l'une des stratégies les plus couramment utilisées par les concepteurs pour améliorer les performances climatiques et énergétiques de la façade (Al-Masrani et al., 2018). En effet, la protection solaire contribue à réduire la consommation énergétique en diminuant l'usage du chauffage, de la climatisation et de l'éclairage artificiel. Elle joue un rôle tout aussi important pour le confort et le bien-être des occupants en offrant, simultanément, gestion de la lumière naturelle, régulation thermique et transparence.

En général, les protections solaires sont utilisées pour diverses raisons, et elles sont disponibles dans une variété de formes, aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur du bâtiment (Van Den Wymelenberg, 2012). Il existe plusieurs types de protections solaires, allant du volet à battant, au store électrique en passant par les brise-soleils orientables (Batier, 2016; Van Den Wymelenberg, 2012). L'utilisation d'un dispositif de protection solaire bien conçu peut offrir des avantages significatifs pour une fenêtre performante qui répond aux exigences d'économie d'énergie et de confort du bâtiment (Goia et al., 2013). Les vitrages permettent d'ouvrir l'espace sur l'extérieur tout en profitant de l'énergie solaire, notamment en hiver où les avantages du rayonnement solaire ne sont plus à démontrer. Mais, pour profiter de ces avantages et se protéger l'été, une bonne gestion de la protection solaire s'impose.

À cet égard, les recherches indiquent que les protections solaires ont le potentiel de réduire la demande de l'énergie de refroidissement, surtout s'ils sont situés à l'extérieur de l'enveloppe thermique (Van Den Wymelenberg, 2012). Ainsi, une fenêtre haute performance combinée à un système d'ombrage extérieur ou à un système de revêtement en verre à faible gain, est une mesure d'économie d'énergie nécessaire pouvant influencer sensiblement les niveaux de confort interne (Manzan, 2014). Pourtant, la configuration des fenêtres et des stores peut s'avérer contradictoire avec la consommation d'énergie du chauffage, du refroidissement et de l'éclairage, et le confort sous l'action du rayonnement solaire. Par conséquent, il est particulièrement important de choisir raisonnablement la configuration des fenêtres et des stores (Zhao & Du, 2020).

La protection solaire permet de réduire le transfert de chaleur vers le bâtiment en bloquant le rayonnement solaire entrant dans la pièce, ainsi que de contrôler l'éblouissement causé par une lumière naturelle excessive, ce qui améliore le confort visuel (Alam & Islam, 2017). La consommation d'énergie du bâtiment est influencée par la position, la forme, et le mode de fonctionnement des protections solaires. Selon une revue de plusieurs études, il existe une

variété de facteurs qui influencent la position des protections solaires. La position des volets peut être étudiée de trois manières : en examinant des photographies des façades prises à différents moments de la journée, en effectuant des investigations à partir de relevés, ou en effectuant des mesures à l'aide de capteurs (Batier, 2016).

La conception des dispositifs d'ombrage doit viser à optimiser le niveau de confort intérieur et à réduire la consommation d'énergie, ce qui est également un problème d'optimisation complexe nécessitant une approche multi-objectifs (Khoroshiltseva et al., 2016; Kirimtat et al., 2019). Samani et al. (2016) ont montré que la protection solaire extérieure est une mesure très efficace pour améliorer le confort thermique. De leur côté, Sghiouri et al. (2018) considèrent qu'une protection solaire extérieure peut optimiser aussi bien le confort que la conservation de l'énergie du bâtiment. Les résultats qu'ils ont obtenus montrent que la demande de refroidissement a été réduite de 4.1% pour le climat méditerranéen de Casablanca.

En général, l'optimisation de la performance de la protection solaire se manifeste principalement à travers la maîtrise de la consommation d'énergie pour l'éclairage, le chauffage, la climatisation, de même que le confort thermique du bâtiment. Certains travaux de recherche ont été menés à des fins d'optimisation des fenêtres ou/et des dispositifs de protection solaire selon un ou plusieurs objectifs (Zhao & Du, 2020). Ainsi, Palmero-Marrero & Oliveira (2010) ont optimisé l'effet des dispositifs d'ombrage des persiennes appliqués à différentes façades de bâtiments à différentes latitudes, et les effets de différentes configurations d'ombrage sur les besoins énergétiques des bâtiments pendant les saisons de refroidissement et de chauffage. L'étude s'est référée aux conditions climatiques de Mexico (Mexique), Le Caire (Égypte), Lisbonne (Portugal), Madrid (Espagne) et Londres (Royaume-Uni). De même, Liu et al. (2019) ont mené une étude pour optimiser l'utilisation des dispositifs d'ombrage sur la façade opaque. Ainsi, ils ont exploré l'impact de différentes configurations de protections solaires sur la consommation d'énergie des immeubles publics typiques à Hong Kong. Les résultats obtenus ont montré que lorsque des panneaux d'ombrage sont appliqués sur la façade Ouest, le potentiel d'économie d'énergie atteint 8%. La recherche fournit également les coefficients d'économie d'énergie optimaux relativement à plusieurs zones considérées pour guider la conception des éléments d'ombrage des façades dans différents contextes urbains. Cependant, la protection solaire peut également avoir des effets négatifs, notamment une consommation d'éclairage artificiel accrue et un gain solaire plus faible en hiver, ce qui conduit à son tour à une augmentation de la consommation d'énergie globale du bâtiment (Khoroshiltseva et al., 2016).

IV.3 Performances du vitrage

Le facteur solaire 'g' est la caractéristique essentielle du vitrage. Il s'exprime en % et définit la quantité totale d'énergie que laisse passer un vitrage par rapport à l'énergie solaire incidente. En d'autres termes, c'est la somme du rayonnement thermique solaire pénétrant par transmission directe et de la proportion de cette énergie absorbée et réémise par le verre dans l'espace intérieur. En effet, le rayon du soleil incident qui atteint le vitrage des ouvertures se répartit en trois parties : une partie réfléchiée, une partie absorbée selon l'épaisseur du verre, et une autre partie transmise vers l'espace intérieur. Sachant que les facteurs de réflexion, d'absorption et de transmission du verre sont déterminés par la relation entre chacune de ces trois parties et le rayonnement solaire incident (Xie et al., 2017). Le facteur solaire étant défini comme le pourcentage du gain total de chaleur solaire entrant dans la pièce à travers le verre, il mesure donc la contribution d'un vitrage à l'échauffement de l'espace intérieur. Plus le facteur solaire est petit, plus les apports solaires sont faibles et inversement.

L'impact du type de vitrage des fenêtres sur les performances énergétiques et d'éclairage naturel du bâtiment a été longuement exploré dans les recherches. Ainsi, Lee et al. (2013) ont optimisé la consommation annuelle d'énergie de chauffage, de refroidissement et d'éclairage en agissant sur les types de vitrages de fenêtres dans une enveloppe de bâtiment. Diverses propriétés de vitrage telles que la valeur U, le coefficient de gain de chaleur solaire (SHGC) et la transmittance visible (Tvis) ont été évaluées avec un programme de simulation informatique. Les résultats montrent que le vitrage triple offre un avantage de performance, en particulier pour économiser l'énergie de chauffage.

Hee et al., (2015) ont révélé l'impact du vitrage sur les performances énergétiques et d'éclairage naturel du bâtiment à travers une revue de la littérature sur des recherches précédentes. Ils ont mis en évidence l'apport des techniques d'optimisation utilisées par différents chercheurs dans le choix d'un vitrage, les technologies innovantes relatives au vitrage ont également été discutées. En outre, Muhaisen and Dabboor (2013) ont mené des recherches pour déterminer l'impact du ratio de l'ouverture, l'orientation et le type de vitrage sur la demande énergétique pour le chauffage et le refroidissement des bâtiments à Gaza, relativement à un climat chaud et humide. Les résultats ont montré que la consommation d'énergie diminue quand la valeur U de transmission thermique du vitrage est minimisée. En outre, l'étude a souligné que l'utilisation des matériaux de vitrages spécifiques à faible transmission est un facteur important dans la réduction de la demande d'énergie.

Dans les climats chauds, la préférence pour les façades vitrées s'accompagne de graves conséquences environnementales et économiques. Des tentatives sont toujours en cours pour trouver le meilleur équilibre entre la réduction des gains de chaleur et l'exploitation optimale des avantages de la lumière du jour de manière rentable. En règle générale, l'utilisation de vitrages spécifiques à faible transmission diminue la conductivité U du vitrage et réduit la consommation énergétique.

Labib and Mayhoub (2015) ont mené une investigation pour évaluer les performances thermo-visuelles d'un bâtiment à façades vitrées dans le climat chaud et sec d'Égypte. Les résultats montrent que la transparence de la façade dans un environnement chaud et sec est une source indésirable de gains de chaleur ainsi que d'éblouissement. La façade excessivement ouverte peut aussi être une source de froid en hivers à cause des déperditions thermiques, ce qui provoque l'augmentation de la consommation d'énergie. D'après cette étude, la meilleure configuration qui combine du verre clair et une étagère lumineuse a considérablement amélioré le confort thermique et l'uniformité de la lumière du jour, elle a également légèrement amélioré la disponibilité de la lumière du jour, conduisant finalement à une économie d'énergie.

Une autre étude menée par Alhagla et al. (2019) dans le but d'évaluer l'effet du type de vitrage sur la consommation d'énergie des bâtiments a également été effectuée en Égypte mais selon les conditions d'un climat méditerranéen d'Alexandrie. Six types de vitrages qui se distinguaient par une valeur U, une transmittance visuelle et un SHGC différents ont été sélectionnés. Les résultats indiquent que le type de vitrage est l'un des facteurs les plus influents sur le fonctionnement thermique du bâtiment, de plus, il contribue à économiser l'énergie tout en évitant l'éblouissement et en réduisant le gain de chaleur. Selon la comparaison des différents types de vitrages avec une valeur U et une transmittance différente, pour le climat d'Alexandrie, une valeur U plus élevée était bénéfique pour économiser de l'énergie. En outre, sur la base de l'effet de la valeur U sur la consommation d'énergie de chauffage et de refroidissement, le vitrage double low-E, le vitrage double low-E-Argon et le vitrage triple-Krypton, ce sont révélés respectivement les plus efficaces pour la réduction de la consommation énergétique.

IV.4 Le ratio d'ouverture des fenêtres de la façade (WWR) : état de l'art

Le ratio d'ouverture des fenêtres de la façade est le rapport de la surface totale de toutes les fenêtres de la façade sur la surface totale du mur extérieur considéré (façade). Le rapport fenêtre/mur joue un rôle important dans la consommation d'énergie des bâtiments pour le chauffage et la climatisation (Yeom et al., 2020).

Plusieurs études ont trouvé un lien entre le ratio d'ouverture, et la consommation d'énergie, cependant, ce paramètre n'a pas été étudié séparément. La corrélation entre le rapport fenêtre/mur et l'orientation de la fenêtre et leur impact sur les besoins en refroidissement, chauffage et la consommation totale d'énergie, a été intégrée par Alghoul et al. (2017). Les résultats de leur recherche indiquent que l'augmentation du ratio fenêtre/mur entraîne une augmentation de la consommation d'énergie de refroidissement et une diminution de la consommation d'énergie de chauffage. Raji et al. (2017) ont étudié les paramètres relatives à la conception et l'efficacité énergétique des immeubles de bureaux dans différents climats. Les ratios d'ouverture optimaux trouvés sont comme de suite : de 20 à 30% dans le climat tempéré, de 35 à 45% dans le climat sous-tropical et de 30% 40% dans le climat tropical. En outre, les orientations les plus sensibles qui augmentent potentiellement l'utilisation totale de l'énergie dans les différents climats considérés, sont respectivement : l'orientation Ouest dans le climat tempéré, l'orientation Nord dans le climat subtropical et les deux façades Est et Ouest dans le climat tropical.

Avec la généralisation de l'architecture de verre et l'attrait de la transparence, le ratio de surface vitrée de la façade a augmenté. Cependant, la performance d'isolation thermique des fenêtres est beaucoup plus inférieure à celle du mur. Par conséquent, de nombreuses études ont été menées pour remédier à cette perte de chaleur. S. H. Kim et al. (2014) ont exploré le sujet, en se basant sur des études antérieures. Cependant, les études examinées semblent plus axées sur les préoccupations d'efficacité énergétique que sur l'éclairage naturel ou le confort thermique. Ainsi, la question persiste, à savoir comment réduire la consommation d'énergie tout en assurant un confort thermique et visuel.

Sur le plan thermique, Alibaba (2016) a trouvé que les pertes et gains de chaleur par les fenêtres ont un impact très important sur le confort thermique des bureaux dans le climat chaud et humide, constatant qu'une augmentation du ratio d'ouverture des fenêtres affecte positivement le confort thermique. De plus, l'étude de Ma et al. (2015) se concentre sur la recherche du ratio d'ouverture maximal d'un bâtiment thermiquement autonome en fonction de la valeur U de l'enveloppe et de l'amplitude de la température ambiante. Sept villes américaines sont étudiées pour représenter une gamme d'amplitudes de température ambiante. Comme la partie fenêtre de l'enveloppe d'un bâtiment est une caractéristique architecturale importante du bâtiment, le ratio d'ouverture et son maximum autorisé en termes d'autonomie thermique sont la signature/le reflet de l'amplitude de la température ambiante locale et la variété des enveloppes du parc

immobilier dans chaque localité. De telles caractéristiques de signal sont autrement appelées architecture régionale.

En outre, Nedha Al-Tamimi and Syed Fadzil (2009) ont cherché l'effet de la taille, l'orientation des fenêtres sur la température de l'air intérieur dans des bâtiments non ventilés dans un climat chaud et humide dans la région tropicale de Malaisie. Les résultats montrent que le climat local affecte grandement l'environnement thermique intérieur des bâtiments. La taille, l'emplacement et l'orientation de vitrage ont un effet critique sur les gains de chaleur et les gains solaires d'un bâtiment, car les zones vitrées ont le gain de chaleur le plus élevé par unité de surface et la majeure partie des gains solaires sont également les fenêtres, l'évaluation du comportement thermique pour tout bâtiment doit tenir compte, des différences significatives dans la température de l'air intérieur entre les pièces sélectionnées peuvent être détectées le même jour même si les pièces sont adjacentes dans une seule unité, et pour l'analyse de la performance thermique dans la conception de bâtiments résidentiels la valeur globale de transfert thermique doit devrait également être considérée comme mur interne.

Le ratio fenêtre/mur a été étudié sur d'autres aspects tels que l'aspect environnemental et social, Su and Zhang (2010) ont étudié l'impact environnemental d'un immeuble de bureaux typique tout au long de son cycle de vie, ils ont étudié l'impact environnemental de l'enveloppe extérieure du bâtiment, ils ont découvert que pendant la phase d'utilisation du bâtiment, les différents ratios des fenêtres avec différentes orientations ont divers effets sur la charge environnementale. Un impact environnemental significatif à mesure que le ratio d'ouverture des fenêtres augmentait. En outre, l'impact est réduit de 9 à 15 % selon les matériaux de la fenêtre. D'autre part, R. Phillips et al. (2020) ont réalisé une étude visant à évaluer les effets environnementaux, économiques et sociaux de divers ratios d'ouverture dans trois zones climatiques différentes des États-Unis. Les résultats ont montré que l'augmentation du ratio d'ouverture des fenêtres dans les grands immeubles de bureaux entraîne une augmentation des impacts environnementaux, de l'insatisfaction des occupants et du coût du cycle de vie.

IV.4.1 Ratio d'ouverture des fenêtres de la façade en climat chaud et sec

Dans un climat chaud et sec, où le ciel clair et le rayonnement solaire intenses sont les caractéristiques principales, les grandes ouvertures fournissent plus de lumière du jour mais augmentent les charges de refroidissement, tandis que les petites ouvertures réduisent la consommation d'énergie mais produisent un inconfort visuel. Par conséquent, il est considéré

comme un climat contraignant lorsqu'il s'agit de fournir à la fois la lumière naturelle, le confort thermique et une faible consommation d'énergie.

Les études s'accordent généralement que les grandes surfaces vitrées ne conviennent pas à ces conditions climatiques. Rashid et al. (2016) ont étudié l'effet du ratio d'ouverture sur le gain de chaleur dans les bâtiments commerciaux, en prenant comme cas d'étude la ville de Lahore qui se caractérise par un climat semi-aride, avec un été chaud et un hiver doux. La recherche s'est focalisée sur deux paramètres la taille des fenêtres et le type de vitrage. Ainsi, différentes tailles des fenêtres (30%, 40%, 50%, 60%) et différents types de verre ont été analysés selon les quatre orientations. Les résultats montrent que le gain de chaleur diminue avec la diminution du ratio d'ouverture sur toutes les orientations, il est maximal avec la plus grande fenêtre du côté Sud et minimal au Nord. Les orientations Est et Ouest ne permettent pas d'avoir de grandes fenêtres en raison des hauteurs basses du soleil, d'où des ratios d'ouverture variant de 20 à 30%.

Une autre étude faite par El Deeb (2013) a porté sur l'effet combiné du ratio fenêtre/mur et de la composition des murs sur la consommation d'énergie d'un bâtiment résidentiel situé dans un climat chaud et aride d'Egypte. Les résultats indiquent que l'isolation thermique n'est pas utile pour tous les climats désertiques, cependant, elle est d'une grande importance dans les climats extrêmement chauds et froids. L'isolation a montré un effet significatif dans de petits rapports jusqu'à 30%, elle n'était pas utile avec les plus petits rapports de 0% à 10%, en outre, l'isolation était inefficace pour les ratios d'ouverture supérieurs à 30% dans les orientations Sud et Ouest.

L'impact des propriétés des fenêtres (forme, matériau, dimensions, position et orientation) sur le confort thermique du bâtiment (température, humidité relative et période d'inconfort), la consommation d'énergie (charges d'éclairage, charges de chauffage et de refroidissement et consommation totale d'énergie), de même que le coût et l'effet environnemental (émissions de CO₂) ont été analysés dans des conditions climatiques semi-arides chaudes par Elghamry & Hassan (2020). Les résultats montrent que les caractéristiques des fenêtres n'ont pas un grand effet sur l'humidité relative. Par contre, l'augmentation du ratio d'ouverture augmente la charge de refroidissement, la température intérieure, la consommation d'énergie et le coût alors que les charges énergétiques d'éclairage et de chauffage se trouvent diminuées.

IV.4.2 Ratio d'ouverture des fenêtres de la façade et approche paramétrique

Les architectes peuvent utiliser plusieurs types de techniques pour trouver une solution considérée comme 'optimale', notamment, l'analyse paramétrique, les algorithmes génétiques, l'optimisation multi-objectifs, ...etc. Dans un cas simple l'analyse paramétrique peut être utilisée avec une seule variable. Pour trouver une solution optimisée, l'utilisateur peut modifier manuellement sa valeur dans une feuille de calcul jusqu'à ce qu'il obtienne un résultat maximal ou minimal indiquant la meilleure solution. Les graphiques peuvent faciliter la visualisation de ces résultats, surtout s'il y a plus d'une variable. Par exemple, une analyse paramétrique sur les performances de l'éclairage naturel en fonction de différentes alternatives de conception de façade doit prendre en compte les variables caractérisant l'éclairage naturel tout en variant les propriétés de la façade. L'analyse paramétrique devra alors recouper manuellement les variables suivantes : l'emplacement (par exemple trois villes), ratios fenêtre-mur (quatre WWR), trois types de verre et quatre orientations ; un ensemble de tableaux et de graphiques seront produits pour faciliter la visualisation des résultats. Finalement, l'analyse paramétrique n'est pas une idée nouvelle, mais l'automatisation et la disponibilité des logiciels l'ont rendue plus facile à mettre en œuvre.

En général, la conception de fenêtres selon des objectifs de performance environnementale implique la prise en compte de plusieurs paramètres, la valeur de chaque paramètre se situe dans une certaine plage de mesures ou indicateurs. Cependant, la complexité de l'intégration des aspects permettant d'optimiser la performance énergétique de la fenêtre avec une méthode de calcul classique a induit le recours à l'aide d'outils numériques. Ces derniers se sont avérés être des moyens puissants pour étudier la performance environnementale du bâtiment et, particulièrement, du système de fenestration, avec la possibilité d'associer la lumière naturelle à l'analyse thermique combinés à la consommation énergétique tout au long du processus de conception. Cependant, ces outils numériques de simulation sont basés sur l'approche des scénarios successifs où des alternatives limitées sont modélisées et évaluées tour à tour, pour ensuite prendre des décisions de conception. Pour modéliser un grand nombre d'alternatives, un grand travail devait être fourni et beaucoup de temps était nécessaire. Au final, cette méthode fondée sur la 'paramétrisation manuelle' s'est révélée imprécise car les concepteurs ne pouvaient choisir qu'un nombre limité de scénarios à simuler et à évaluer à la fois.

Pour surmonter les contraintes et les limites mentionnées, le recours à la modélisation paramétrique était inévitable. Avec le développement de l'informatique, la recherche en génie du bâtiment commença à s'intéresser à l'application des algorithmes évolutionnaires selon des approches multi-objectifs d'optimisation énergétique. Ces dernières années, des améliorations majeures ont été apportées à l'optimisation des bâtiments, et le terme 'calcul évolutif' est bien connu pour sa capacité à résoudre des problèmes complexes. De ce point de vue, l'optimisation est la procédure consistant à trouver la valeur minimale ou maximale d'une fonction en choisissant des variables sélectionnées soumises à un certain nombre de contraintes (Machairas et al., 2013). Les algorithmes évolutifs 'multi-objectifs' de même que les algorithmes génétiques peuvent être utilisés pour résoudre des problèmes de conception complexes qui nécessitent de nombreuses itérations afin de découvrir des solutions de conception optimales répondant à certains critères fixés par l'utilisateur (Konis et al., 2016).

Souvent, l'optimisation multi-objectifs est utilisée pour deux variables (par exemple, analyser la consommation de l'électricité pour l'éclairage artificiel et les besoins de refroidissement en fonction de différentes tailles de fenêtres). Mais les algorithmes d'optimisation multi-objectifs peuvent gérer un nombre important et arbitraire d'objectifs au prix d'une réduction de la vitesse de calcul. Dans ce cas, le « front de Pareto » (*Pareto front* en anglais) est souvent utilisé pour illustrer les résultats de l'optimisation ; il s'agit d'une courbe qui relie toutes les solutions optimales pour les objectifs et contraintes définis. Le « Pareto front fait référence à une surface de solution dans un espace de solution multidimensionnel formé par de multiples critères représentant les objectifs » (Ciftcioglu et Bittermann, 2009). Pour les solutions multi-variées, un espace visuel de solutions est fourni qui s'étend idéalement d'un compromis extrême à un autre. De nombreux projets de recherche ont adopté l'utilisation d'algorithmes évolutionnaires multi-objectifs. C'est également le cas des études qui s'intéressent à l'optimisation de la performance environnementale du bâtiment. Pour cet axe de recherche qui inclut : l'enveloppe du bâtiment et la fenestration, l'enveloppe du bâtiment et la conception des fenêtres pour optimiser les performances thermiques et d'éclairage naturel, l'impact du WWR sur le chauffage, refroidissement et éclairage, etc., cette approche et outils se sont révélés très prometteurs.

Selon Qingsong and Fukuda (2016), concevoir de manière paramétrique signifie explorer la variation des paramètres dans un espace de conception et peut être utilisé comme un outil de décision pour déterminer un ensemble de solutions qui satisfont (ou sont proches de satisfaire) un problème donné avec de nombreuses exigences. L'analyse paramétrique offre la possibilité

d'explorer les performances du bâtiment pour différentes combinaisons de choix de conception dans les premières étapes du projet et peut ainsi contribuer à des améliorations de l'efficacité énergétique (Konis et al., 2016). Par conséquent, cette approche est de plus en plus utilisée par les concepteurs et les architectes pour résoudre des problèmes de conception complexes notamment ceux liés aux questions environnementales. Par exemple, prédire, évaluer et quantifier les performances d'un bâtiment au stade de l'esquisse peut permettre aux utilisateurs (architectes, chercheurs, etc.) d'éviter le surcoût énergétique (J. Zhang et al., 2020).

L'approche multi-objectifs a été utilisée dans d'innombrables recherches s'intéressant à l'optimisation du rapport fenêtre/mur (WWR) ; c'est le cas de Mangkuto et al. (2016) qui ont mené une étude d'optimisation multi-objectifs pour évaluer l'influence du rapport fenêtre-mur sur la lumière du jour et la demande d'énergie pour l'éclairage électrique dans des bâtiments simples situés dans le climat tropical en agissant sur la réflectance des murs et l'orientation des fenêtres. Les résultats ont révélé que la solution la plus optimale est un ratio fenêtre/mur de 30% avec une réflectance murale de 0.8 à condition que l'orientation soit le Sud. De son côté, Goia (2016) a investi une étude pour déterminer le rapport fenêtres/mur optimal en se basant sur l'estimation de la consommation d'énergie totale pour le chauffage, la climatisation et l'éclairage électrique. Les valeurs optimales du ratio fenêtres/mur se trouvèrent dans une plage relativement étroite entre 30 et 45 %. En outre, la consommation totale d'énergie pouvait être réduite de 5 à 25 %. En outre, pour trouver la réduction optimale de la consommation d'énergie pour le chauffage et l'éclairage dans une école relativement au climat froid de Chine, A. Zhang et al. (2017) ont adopté l'approche d'optimisation paramétrique multicritères. Plusieurs configurations spatiales ont été étudiées et différents paramètres ont été explorés, y compris l'orientation, la profondeur de la salle de classe et la profondeur du couloir, le ratio d'ouvertures des différentes fenêtres de façades, matériaux de vitrage et types de la protection solaire. Les résultats ont dévoilé que la demande d'énergie pour le chauffage et l'éclairage peut être réduite de 24 à 28 % et la gêne thermique estivale de 9 à 23 % tandis que l'éclairage utile de la lumière du jour (UDI) compris entre 100 à 2000 lux était simultanément augmenté de 15 à 63 %.

Pour leur part, Zhai et al. (2019) ont proposé une méthode d'optimisation multi-objectifs qui consistait à combiner un algorithme génétique avec EnergyPlus pour l'optimisation de la conception des fenêtres. Les résultats ont indiqué que la conception des fenêtres, intègre divers paramètres tels que l'orientation, la taille de la fenêtre et le matériau du verre. Ces paramètres ont une influence significative et interactive sur les performances du bâtiment. Plus récemment,

Zhao and Du (2020) ont proposé une méthode pour optimiser le ratio d'ouverture avec des brise-soleil en considérant à la fois les performances d'éclairage naturel et la consommation d'énergie. Un grand nombre de modèles avec différents ratios d'ouverture et protections solaires externes sont explorés, et des calculs ont été effectués pour estimer les performances d'économie d'énergie et d'éclairage naturel et déterminer les solutions optimales. Les résultats trouvés révélèrent que les brise-soleils ont les meilleures performances énergétiques. Une augmentation à 40% du ratio d'ouverture était nécessaire pour répondre aux exigences d'éclairage naturel. Les fenêtres orientées à l'Ouest, au Nord, à l'Est et au Sud pouvaient atteindre des rapports fenêtres/mur respectivement de 56%, 60%, 6% et 78%. De plus, Delgarm et al. (2016) ont appliqué l'optimisation multi-objectifs en utilisant un algorithme génétique pour étudier le rapport du confort thermique à la consommation énergétique dans une seule pièce de bureau ; les paramètres considérés étaient : l'orientation de la pièce, la taille de la fenêtre, les propriétés du vitrage et des matériaux des murs. Les résultats de l'optimisation à double objectif indiquèrent que dans différents climats, même si la consommation totale d'électricité du bâtiment augmente un peu d'environ 2.9-11.3 %, le PPD diminue considérablement d'environ 49.1-56.8 % par rapport au modèle de référence.

Dans le climat chaud et sec, Labib and Mayhoub (2015) ont également utilisé une approche paramétrique à l'aide de l'outil de conception paramétrique Grasshopper et les plug-ins Honeybee & Ladybug. L'investigation a porté sur le type de vitrage dans le bâtiment à usage de bureau pour obtenir les meilleures performances thermo-visuelles. Les résultats montrent que la façade vitrée en climat chaud et sec constitue une source indésirable de gains de chaleur et provoque l'éblouissement, d'autre part elle peut aussi être une source de froid en hiver et induire une augmentation conséquente de la consommation énergétique. Pour cette étude, la meilleure configuration a combiné un vitrage ultra-clair avec une protection lightshelf, cela a augmenté la performance visuelle du cas de référence de plus de 5%, il a presque doublé l'uniformité de l'éclairage et il a diminué la température moyenne de rayonnement de plus de 5°C.

IV.4.3 Positionnement épistémologique

La conception de l'enveloppe et des fenêtres, en particulier, peuvent être des facteurs clés pour la réalisation d'environnements intérieurs confortables, et bien sûr pour la conservation de l'énergie (Winterbottom & Wilkins, 2009). Cependant, la conception des fenêtres est un problème complexe et délicat, car une fenêtre doit non seulement assurer la ventilation et faire

pénétrer la lumière, mais elle doit également minimiser les gains de chaleur et s'opposer à leur perte selon la saison. De ce point de vue, la conception de la fenêtre a un impact sur la consommation d'énergie du bâtiment et peut affecter négativement les conditions climatiques intérieures.

D'autre part, comme indiqué dans les recherches précédentes, l'équilibre entre la lumière naturelle, le confort thermique et la consommation d'énergie est l'un des objectifs de conception les plus importants dans les bâtiments scolaires. Cependant, la réalisation d'un environnement intérieur sain et confortable dans les salles de classe est relativement une tâche complexe. De nombreuses études ont montré que les facteurs de confort environnemental peuvent grandement affecter le processus d'apprentissage (da Graça et al., 2007). La littérature sur la conception des bâtiments scolaires a mis en évidence les effets de la lumière du jour et du confort thermique sur la santé et les performances des utilisateurs des bâtiments scolaires qu'ils soient élèves ou enseignants (Barbhuiya & Barbhuiya, 2013; A. Zhang et al., 2017). En particulier, un éclairage insuffisant ou excessif ainsi que l'inconfort thermique ont un impact négatif sur leur satisfaction et affectent leur performance (Ochoa et al., 2012; Zahiri & Altan, 2016).

Les chercheurs et les concepteurs s'accordent sur l'importance de l'éclairage naturel et du confort thermique pour améliorer la qualité environnementale des espaces d'apprentissage et reconnaissent la nécessité et le défi d'équilibrer ces exigences avec une consommation d'énergie réduite (Ochoa et al., 2012; Sadick & Issa, 2018). Par conséquent, une conception minutieuse de l'enveloppe du bâtiment scolaire est importante, en utilisant des approches de conception passive. Des études ont mis en évidence que les conditions environnementales intérieures dans les établissements scolaires dépendent fortement de leurs caractéristiques architecturales et constructives y compris : la disposition, l'orientation, la configuration de l'espace, les propriétés de l'enveloppe thermique du bâtiment, ainsi que le rapport fenêtre/mur, le type de vitrage, et les protections solaires (Tabadkani et al., 2018).

L'application des techniques de conception passive nécessite une connaissance approfondie du climat pour créer des bâtiments adaptés à leur contexte et performants (Albatayneh et al., 2019). La littérature relative aux bâtiments éducatifs dans les climats chauds et secs est très insuffisante en comparaisons avec l'important nombre de recherches effectuées dans les climats tempérés et froids. En Algérie, seulement quelques études ont porté sur les établissements scolaires tels que (Benharkat, 2006; Chakali, 2019; Saddok, 2015), et très peu ont traité les établissements scolaires sous les conditions climatiques chaudes et arides. En outre, ces études ont la

particularité d'aborder un seul aspect à la fois : soit formel (configuration), ou alors en termes de confort visuel ou thermique. Cependant, l'influence combinée des trois paramètres de performance environnementale : éclairage naturel, confort thermique, et consommation énergétique, n'a pas encore été explorée. De plus, les standards et normes qui donneraient des recommandations relatives à la conception de bâtiments scolaires performants, comme c'est le cas de beaucoup de pays, n'existent pas encore en Algérie.

Par manque d'indications précises, en général, les petits ratios de fenêtres sont recommandés pour la façade sous les conditions d'un climat chaud et sec, notamment, pour limiter les surchauffes. Mais, quand il s'agit des salles de classe, cela n'est pas toujours une bonne solution. L'on sait en effet, l'importance de la lumière du jour pour le processus d'enseignement et d'apprentissage, or, les petites ouvertures procurent un éclairage insuffisant. L'idéal serait donc d'obtenir un environnement intérieur thermique et visuel satisfaisant tout en maintenant une faible consommation d'énergie. Un équilibre minutieux des caractéristiques de conception de l'enveloppe liée au ratio d'ouverture de la façade permet d'atteindre les trois objectifs (performance lumineuse, thermique, et énergétique). D'autre part, les algorithmes génétiques ont montré leur efficacité pour résoudre les problèmes spécifiques et complexes (Bakmohammadi & Noorzai, 2020).

Cette recherche vise à comprendre l'impact du ratio d'ouverture de la façade sur la performance environnementale des établissements scolaires, en prenant la ville de Biskra comme exemple des régions chaudes et sèches d'Algérie. La conception de bâtiments scolaires performants dans ces régions est particulièrement difficile en raison des conditions climatiques extrêmes. Plus précisément, la recherche vise à explorer des combinaisons potentielles du rapport fenêtre/mur, type de vitrage et protection solaire qui aideraient à maintenir une lumière du jour et des performances thermiques adéquates, tout en garantissant une faible consommation d'énergie.

Conclusion

La fenêtre est un composant transparent de l'enveloppe jouant un rôle crucial dans la performance du bâtiment. Elle permet la pénétration de la lumière désirable et, de fait, contribue à réduction de la consommation énergétique de l'éclairage. De plus, elle exploite le rayonnement solaire en hiver pour un réchauffement passif des espaces, réduisant également la consommation d'énergie de chauffage. Cependant, les gains solaires pénétrant par la fenêtre peuvent également induire des effets négatifs, particulièrement, durant la saison chaude ou ils

seront source de surchauffe et responsables d'une consommation supplémentaire d'énergie pour le rafraîchissement. Par conséquent, dans les régions à climat chaud et sec où l'ensoleillement est excessif et les températures très élevées en été, l'intégration d'une protection solaire et d'un vitrage à haute performance thermique est nécessaire pour contrôler la lumière et les irradiances solaires pénétrant l'espace.

Parmi les aspects impliqués dans la conception de la fenêtre, les chercheurs affirment que le rapport fenêtre/mur a un impact important sur la performance du bâtiment. En règle générale, l'éclairage naturel augmente lorsque le rapport fenêtre/mur augmente, mais en contre partie, les gains de chaleur seront également amplifiés. De même, un ratio d'ouverture plus élevé signifie que plus de chaleur sera échangée entre l'environnement et le bâtiment. Ce qui consommera plus d'énergie pour réguler l'environnement intérieur.

Ce problème est plus complexe dans les espaces scolaires où le besoin de l'éclairage naturel est important. La revue de la littérature a montré que l'approche d'optimisation multi-objective peut être appliquée afin de trouver un compromis entre les différents objectifs contradictoires pour réaliser des bâtiments scolaires aussi bien performants en termes d'efficacité énergétique que satisfaisant en termes de confort lumineux et thermique.

*Deuxième Partie : Cadre
Méthodologique, Analyse et
Optimisation*

*Chapitre V : Cas d'étude et analyse
empirique*

Introduction

Dans le climat chaud et aride, la conception de la fenêtre est un défi pour les architectes. En effet, il est difficile de faire des compromis parfois contradictoires comme d'assurer non l'éclairage naturel et la ventilation, mais aussi, faire en sorte que les apports solaires qui peuvent être à l'origine de surchauffe, soient réduits au minimum. En général, les petites fenêtres et les murs épais avec une grande capacité de stockage thermique font partie des recommandations architecturales pour concevoir un bâtiment dans les zones à climat chaud et sec. Mais ces principes de conception généraux peuvent provoquer une insuffisance dans l'éclairage naturel et, et de fait, entraîner un manque de confort visuel. Cette question critique devient plus compliquée dans les salles de classe, où l'importance de la lumière du jour est cruciale. En outre, les bâtiments scolaires par leur fonction et leur mode d'occupation se distinguent par une conception architecturale assez particulière. En général, les écoles requièrent des niveaux d'éclairage et une ventilation naturelle. Ces exigences se répercutent sur la morphologie de tels bâtiments puisqu'ils apparaissent souvent avec des formes articulées permettant de grandes surfaces de murs extérieurs et un maximum de surfaces vitrées.

Le présent chapitre est consacré à l'élaboration du cadre méthodologique et au travail de terrain sous forme de mesures in situ. Le chapitre commence par présenter l'analyse préliminaire relative aux établissements scolaires de la ville de Biskra. L'objectif est de sélectionner un ensemble de bâtiments scolaires pour constituer le corpus de l'étude. Une fois les exemples sélectionnés, des prises de mesures de températures et de niveau de lumière du jour ont été effectuées. L'objectif étant l'évaluation quantitative de l'éclairage naturel et des gains thermiques dans des salles de classe qui se distinguaient principalement par des ratios d'ouverture différents. Le chapitre présente également le protocole de prises de mesure, la collecte de données et le traitement des résultats. Cette partie empirique permettra d'identifier les problèmes puis de les optimiser.

V.1 Présentation de contexte et d'objet d'étude

Pour cerner l'impact du ratio d'ouverture des murs de la façade sur la performance des bâtiments scolaires, la ville de Biskra a été choisie comme contexte de l'étude ; Biskra est une ville saharienne située à 470 kilomètres au sud-est d'Alger (Figure V.1) avec une latitude de 34.48°N, une longitude de 5.44°E et une altitude de 86 mètres. Le climat de Biskra est classé comme un climat chaud et sec et se situe dans la zone BWh dans la classification climatique de Köppen (Semahi et al., 2019). Les conditions climatiques prévalant à Biskra sont assez rudes,

caractérisées notamment par des températures élevées, un rayonnement solaire intense, et une humidité relative généralement faible surtout en été. Les précipitations sont rares, et une grande amplitude de température existe entre le jour et la nuit (Berghout, 2012). Pour plus des détails sur les caractéristiques climatiques de la ville de Biskra voir (Annexe A).

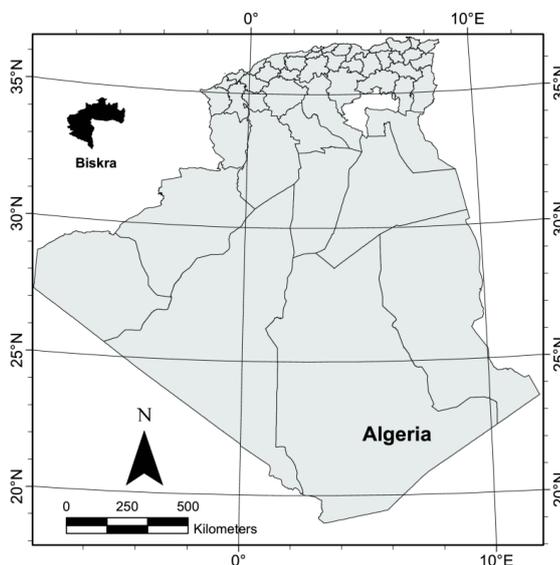


Figure V. 1 : Localisation géographique de la ville de Biskra, Source : (Azzouzi, 2019)

V.2 Sélection et analyse de l'objet d'étude

Les écoles d'enseignement publiques (moyennes et secondaires) de la ville de Biskra ont été choisies pour servir de cas d'étude. Le travail de terrain devait être effectué sous forme de mesures in situ ; il a été précédé par une investigation prospective couvrant l'ensemble des établissements scolaires de type CEM et Lycées de Biskra, suivie d'une analyse typologique des exemples présélectionnés dans l'aire d'étude, selon la période (coloniale, indépendance, contemporaine) et l'année de leurs réalisations. À ce titre, le travail d'investigation a été focalisé sur la collecte de documents graphiques sous forme de plans architecturaux des exemples à analyser. En outre, des visites sur terrain ont été effectuées avec prise de photos et parfois élaboration des relevés pour compléter les informations manquantes.

Cette analyse préalable vise à prendre connaissance de la réalité de l'objet d'étude et, par la suite, sélectionner un échantillon de bâtiments scolaires pouvant servir en tant que corpus pour l'étude. Au total, dix-huit (18) écoles ont été visitées et analysées (Figure V.2).

L'annexe B (Voir Annexes) contient une description des caractéristiques générales des 18 écoles sélectionnées, incluant des plans architecturaux et photographies nécessaires pour donner une idée précise sur chaque école. L'annexe B fournit également une analyse détaillée des écoles, fondée sur un ensemble de critères indiquant les caractéristiques des blocs éducatifs, des salles de classe courantes et des propriétés des fenêtres tels qu'indiqué dans le Tableau V.1.

L'analyse typologique des différentes configurations des blocs d'enseignement, ainsi que celle des caractéristiques des salles de classe et des fenêtres (Tableau V.2) permet de comparer les exemples analysés entre eux et de ressortir avec des catégories (groupes) et des types dominants. Ce qui facilite la sélection des exemples d'écoles à prendre comme cas d'étude et qui seront les plus appropriés par rapport aux objectifs de l'étude.

Suite à l'analyse typologique, des classifications ont été faites en fonction de la surface des fenêtres (Tableau V.3), du rapport de la surface des fenêtres à la surface du plancher dans les salles de classe (Tableau V.4), et du rapport de la surface des fenêtres à la surface des murs extérieurs des salles de classe (Tableau V.5). Selon ces critères, trois grands groupes ont été distingués.

Tableau V. 2 : Analyse typologique des 18 établissements scolaires sélectionnés dans la ville de Biskra

Critères d'analyse	CEM YOUSEF EL AMOUDI	CEM LES FRERES GUERROUF	CEM BACHIR BEN NACER	CEM GHAMRI HOUSSINE	LYCEE CHIKH MOHAMED KHEIREDDINE	CEM ZAGHEZ DJELLOUL	CEM ADJEL MAHMOD	CEM AHMAD RIDA HOUHOU	CEM HLIMI RACHID	CEM MOHAMED BEN EL MADANI EZZIN	LYCEE SAID ABID	CEM BRAHIMI MOHAMED BEN HAMMI	CEM HAMOUDI MOHAMED D ESGHIR	CEM AHMED ZID	LYCEE ACHOURI MOSTAFA	LYCEE RACHID RIDA EL ACHOURI	LYCEE SI EL HAWAS	CEM ABBES ABD LEKRIM BEN MOHAMED
Année	1830	1952	1972	1979	1980	1982	1982	1985	1995	1998	2001	2002	2003	2004	2004	2005	2008	2010
Type	coursive	coursive	coursive	Coursive	coursive	coursive	corridor central	coursive	coursive	corridor central	coursive	mixte	corridor central	coursive	mixte	coursive	corridor central	coursive
Nombre de niveaux	R+1	R.D.C	R+2	R+1	R+1	R+1	R+2	R+1	R+1	R+1	R+1	R+1	R+1	R+1	R+1	R+2	R+2	R+2
Orientation du bâtiment	E/O, N/S	E/O, N/S	N-O/S-E	N-O/S-E	N-O/S-E, N-E/S-O	N/S	N-O/S-E	N/S	E/O	N-O/S-E	N/S, N-E/S-O	N/S	N/S	N-E/S-O, N-O/S-E	E/O	N-O/S-E	N-O/S-E	E/O, N/S
Forme du bloc d'enseignement																		
Orientation du Fenêtres	N/S, E/O	N/S, E/O	N-E/ S-O	N-O/ S-E	N-E/S-O, N-O/S-E.	N-E / S-O	N-O / S-E.	E/O	N/S	N/S	N/S, N-O/S-E.	E/O	E/O	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S, E/O
Epaisseur (cm)	53	35	25	45	43	44	73	44	35	40	32	32	40	32	34	34	32	34
Couleur murs Intérieur/ Extérieur	Vert/beige	Mauve/vert	Rose/beige	Bleu ciel/ crème	Bleu ciel/ crème	Vert/ crème	Vert / verre	Vert / beige	Rose-vert/ mixtes	mixtes / beige	Vert/ crème	Vert / beige	Bleu ciel/ vert	Gris/ beige	beige/ vert	Gris/ crevette	Crevette/ beige	Beige/ beige
Largeur salle (m)	8.94	8.90	8.4	7.90	9.0	8.5	9.18	8.60	8.75	9.13	8.65	10.48	9.14	8.84	8.45	8.41	9.30	9.05
Profondeur salle (m)	7.0	5.97	8.4	6.88	5.97	6.52	6.27	6.60	6.57	6.68	6.59	6.85	6.0	6.65	6.51	6.88	6.70	6.90
Surface salle (m²)	62.58	53.133	70.56	54.352	53.73	55.42	57.5586	56.76	57.4875	60.98	57.003	71.788	54.84	58.786	55	57.8	62.31	62.445
Hauteur Salle (m)	4.8	3.23	3.50	3.23	3.80	4.08	3.70	4.08	3.40	2.80	4.08	3.74	3.53	3.74	3.52	3.74	3.80	3.74
Hauteur Fenêtre (m)	0.80	0.90	0.56	0.85	0.85	1.0	1.30	1.0	1.30	0.95	1.0	1.0	0.95	0.1	0.9	1.0	1.0	1.0
Position	H		X						X									
	V	X	X	X	X	X	X	X		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Protection	Fixe		X															
	Mobile	X	X			X				X	X			X		X	X	X
	Aucun		X	X	X		X	X	X			X	X		X			
Autre	Peinture	Peinture/ papiers	Peinture	Peinture						Peinture								
Type de vitrage	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple	Simple
Forme de la fenêtre																		

Tableau V. 3 : Classification des écoles selon la surface des Fenêtres

Les Ecoles	CEM ADJEL MAHMOD	CEM GHAMRI HOUSSINE	CEM HAMOUDI MOHAMED ESGHIR	LYCEE SI EL HAWAS	CEM BRAHIMI MOHAMED BEN HAMMI	CEM MOHAMED BEN EL MADANI EZZIN	CEM AHMED ZID	CEM HLIMI RACHID	LYCEE ACHOURI MOSTAFA	CEM LES FRERES GUERROUF	LYCEE CHIKH MOHAMED KHEIREDDINE	LYCEE SAID ABID	CEM ABBES ABD LEKRIM BEN MOHAMED	LYCEE RACHID RIDA EL ACHOURI	CEM AHMAD RIDA HOUHOU	CEM ZAGHEZ DJELLOUL	CEM YOUSEF EL AMOUDI	CEM BACHIR BEN NACER
Nombre Fenêtres par salle	2	5	9	4	6	9	5	3	6	5	7	7	7	7	5	5	4	3
Surface Fenêtres (m ²)	2.6	4.2	5.85	6.48	6.53	6.79	6.8	6.9	8.4	9.75	10.25	10.5	10.5	11.34	12.69	13.5	18	20.75
Taille	Petite										Moyenne						Grande	

Tableau V. 4 : Classification des écoles selon le rapport de la surface des fenêtres sur la surface de plancher des salles de classe (Ratio fenêtres/ plancher)

Les Ecoles	CEM ADJEL MAHMOD	CEM GHAMRI HOUSSINE	CEM BRAHIMI MOHAMED BEN HAMMI	LYCEE SI EL HAWAS	CEM HAMOUDI MOHAMED ESGHIR	CEM MOHAMED BEN EL MADANI EZZIN	CEM AHMED ZID	CEM HLIMI RACHID	LYCEE ACHOURI MOSTAFA	CEM ABBES ABD LEKRIM BEN MOHAMED	CEM LES FRERES GUERROUF	LYCEE SAID ABID	LYCEE CHIKH MOHAMED KHEIREDDINE	LYCEE RACHID RIDA EL ACHOURI	CEM AHMAD RIDA HOUHOU	CEM ZAGHEZ DJELLOUL	CEM YOUSEF EL AMOUDI	CEM BACHIR BEN NACER
Surface des Fenêtres(m ²)	2.6	4.2	6.53	6.48	5.85	6.79	6.8	6.9	8.4	10.5	9.75	10.5	10.25	11.34	12.69	13.5	18	20.75
Surface (m ²) plancher/salle	57.5586	54.352	71.788	62.31	54.84	60.9884	58.786	57.48	55.0095	62.445	53.133	57.0035	53.73	57.8608	56.76	55.42	62.58	70.56
Ratio Fenêtres/ Plancher	0.04	0.07	0.09	0.10	0.10	0.11	0.11	0.12	0.15	0.16	0.18	0.18	0.19	0.195	0.22	0.24	0.28	0.29
Pourcentage %	4.51	7.72	9.09	10.39	10.66	11.13	11.5	12	15.27	16.8	18.35	18.41	19	19.5	22.35	24.35	28.76	29.40
Groupe	Pourcentage ≤10					0 < Pourcentage ≤ 20								Pourcentage > 20				
Taille	Petite					Moyenne								Grande				

Tableau V. 5 : Rapports de la surface des fenêtres sur la surface des murs extérieurs des salles de classe

Les Ecoles	CEM ADJEL MAHMOD	CEM GHAMRI HOUSSINE	CEM HAMOUDI MOHAMED ESGHIR	LYCEE SI EL HAWAS	CEM BRAHIMI MOHAMED BEN HAMMI	CEM MOHAMED BEN EL MADANI EZZIN	CEM AHMED ZID	CEM HLIMI RACHID	LYCEE ACHOURI MOSTAFA	CEM LES FRERES GUERROUF	LYCEE CHIKH MOHAMED KHEIREDDINE	LYCEE SAID ABID	CEM ABBES ABD LEKRIM BEN MOHAMED	LYCEE RACHID RIDA EL ACHOURI	CEM AHMAD RIDA HOUHOU	CEM ZAGHEZ DJELLOUL	CEM YOUSEF EL AMOUDI	CEM BACHIR BEN NACER
Codification	S1.1 S1.2	S2.1 S2.2	S3.1 S3.2	S4.1 S4.2	S5.1 S5.2 S5.3	S6.1 S6.2	S7.1 S7.2	S8.1 S8.2	S9.1 S9.2	S10.1 S10.2	S11.1 S11.2	S12.1 S12.2	S13.1 S13.2	S14.1 S14.2	S15.1 S15.2	S16.1 S16.2	S17.1 S17.1	S18.1 S18.2
Nombres Murs Extérieurs	2 1	2 2	3 2	1 2	1 1 2	2 1	3 3	2 3	1 2	2 3	2 3	2 3	2 3	2 3	2 3	2 3	2 2	2 3
Surface Fenêtres (m ²)	2.6 2.6	4.2 5.52	8.7 6.53	6.48 6.48	6.53 5.85 5.85	6.79 6.79	8.16 6.8	6.9 6.9	8.4 8.4	9.75 9.75	10.25 10.25	10.5 10.5	10.5 10.5	11.34 11.34	12.6 12.6	13.5 13.5	18 13.5	20.7 20.7
Surface Murs Extérieurs (m ²)	43.3 25.9	47.7 51.03	104 64.81	35.34 60.8	39.1 32.2 55.5	43.3 25.01	115 86.8	59.5 81.8	29.7 52.6	48.0 57.4	68.4 91	70.5 97.4	67.6 93.5	62.90 88.6	70.1 97.10	69.3 95.9	85.8 76.5	58.8 88.2
Ratio Fenêtres/Murs	0.06 0.10	0.09 0.11	0.08 0.10	0.18 0.10	0.17 0.18 0.10	0.16 0.27	0.07 0.08	0.11 0.08	0.28 0.15	0.20 0.17	0.15 0.12	0.15 0.11	0.15 0.11	0.18 0.13	0.18 0.13	0.19 0.14	0.20 0.18	0.35 0.23
groupe	1 1	1 2	1 1	2 1	2 2 1	2 3	1 1	1 1	3 2	2 2	2 2	2 2	2 2	2 3	2 2	2 2	2 2	3 3

V.3 Interprétation des résultats de l'analyse typologique

V.3.1 Bloc d'enseignement

- **Période/ datation** : les écoles sélectionnées couvrent les trois périodes principales de l'évolution urbaine de la ville de Biskra. Ainsi, les écoles héritées de l'ère coloniale sont peu nombreuses et de style assez remarquable affichant une expression formelle empruntée au néo-mauresques (utilisation des arcs, coupoles, moucharabiehs, mosaïques, tuiles décoratives,...). Les écoles construites dans les années 70 et 80 (période indépendance), sont relativement nombreuses, considérant que durant les deux premières décennies de l'indépendance, l'Algérie a investi beaucoup d'efforts et de moyens pour combler le manque en infrastructures scolaires hérité de l'époque coloniale. Les établissements scolaires construits pendant cette période sont caractérisés par une diversité remarquable dans le choix des formes et des styles architecturaux. La troisième période, des années 90 jusqu'à nos jours (période contemporaine), est moins riche architecturalement. La réalisation des écoles est caractérisée par la standardisation et l'utilisation des «plans-types».
- **Types** des blocs d'enseignement: trois configurations pour la conception des blocs d'enseignement des établissements scolaires dans la ville de Biskra ont été relevées: le plan à corridor centrale, le plan à coursive, et le plan mixte. La typologie du plan à coursive est la plus courante représentant 70% du total, suivie par la typologie du corridor central qui représente 20%, enfin, la typologie mixte ne représente que 10% seulement.
- **Hauteur** blocs d'enseignement: 70% des écoles étudiées avaient une hauteur équivalente à un rez-de-chaussée plus un étage (R+1), et 27% des écoles avaient une hauteur égale à un rez-de-chaussée plus deux étages (R+2).
- **Orientation** : les blocs d'enseignement sont généralement orientés selon les axes principaux (Nord / Sud) et (Est / Ouest), toutefois, un nombre important d'écoles sont orientées selon les axes secondaires (Nord-Ouest / Sud-Est) et (Nord-Est / Sud-Ouest).
- **Système constructif** : il dépend de la période de réalisation et parfois de l'année de construction. Ainsi, les écoles héritées de l'ère coloniale se caractérisent par leurs murs extérieurs épais (porteurs), de grandes fenêtres en façade et un toit supporté par des poutrelles d'acier. Le style architectural utilisé est marqué par des touches néo-mauresques (utilisation des arcs, coupoles, moucharabiehs, mosaïques, tuiles décoratives,...). Les écoles construites dans les années 70 et 80 (période indépendance), sont caractérisées par une

diversité remarquable dans le choix des formes et des styles architecturaux. Le système constructif est dominé par le béton armé et le ciment (ossature en béton armé, murs en parpaings de ciment ou en briques, planchers en corps creux, etc.), cependant, des écoles ont également été réalisées en préfabriqué. La troisième période contemporaine est caractérisée par la standardisation ainsi que la répétition selon le principe des «plans-types». Il y a peu -voire pas de recherche- pour faire évoluer l'architecture scolaire ; le recours aux plans-types est très courant. Il n'y a pas également d'innovation concernant le système constructif et les matériaux.

- **Matériaux de construction** : le choix du mode constructif est lié à la période de réalisation. Mis à part la période coloniale, il est généralement standard (poteau-poutre en béton armé) et un remplissage en matériaux courants, notamment, la brique creuse pour les murs et cloisons.

V.3.2 Salles de Classe

- **Géométrie** : la salle de classe « type » a une forme rectangulaire proche du carré. Les dimensions varient comme suit: de 8.40 à 9 mètres de longueur, de 6 à 8.4 mètres de largeur, ce qui signifie que la superficie de la salle de classe varie de 50 à 70 mètres carrés. La hauteur de la salle de classe varie de 2.80 à 4.08 mètres, l'épaisseur des murs extérieurs varie entre 30 à 73 cm.
- **Couleur** : les couleurs dominantes sont les couleurs claires, que ce soit dans les murs intérieurs ou extérieurs, comme le gris, le vert clair, le bleu ciel, le beige, le crème, le rose clair, etc.
- **Ventilation/ Éclairage** : **naturel** les salles de classe sont aérées et éclairées directement par les fenêtres ouvrant vers la cour, la rue, ou bien le corridor intérieur. Certaines écoles ont des fenêtres surélevées à hauteur du plafond pour renforcer la ventilation.
- **Climatisation** : l'installation de la climatisation dans les salles de classe est indispensable dans la région chaude et aride selon les consignes de la tutelle. Cependant, la majorité des appareils ne fonctionnent pas. De plus, toutes les écoles sont équipées d'un système de ventilation mécanique.

V.3.3 Fenêtres

- **Forme** : l'analyse des dix-huit écoles datant de différentes époques a révélé que la forme des fenêtres est toujours rectangulaire. La plupart avec une position verticale et une hauteur d'allège de 0.8 m à 1.3 m. Dans certains cas, des fenêtres à une hauteur de 1.7 m ou de 2 m

sont utilisées pour l'aération. Une certaine richesse a été remarquée dans les écoles construites dans l'époque postindépendance (années 70-80); par exemple, le CEM BACHIR BEN NACER construit en 1972 a des fenêtres en bandeaux de 4 m de large. Les salles de classe d'une autre école GHAMRI HOUSSINE construite en 1979, sont équipées de plusieurs petites fenêtres de 0.5 m de large. Cependant, au fil du temps, il y avait une tendance vers la typification et le répétition ; les fenêtres dans toutes les nouvelles écoles ont la même forme rectangulaire et une dimension standard (1 m x 1.5 m). Des fenêtres cintrées sont également apparues dans les nouvelles écoles.

- **Orientation** : l'orientation des fenêtres dans les salles de classe n'est soumise à aucune norme ou réglementation de conception. Les salles de classes s'ouvrent dans les quatre directions (Est, Ouest, Nord et Sud), et les directions secondaires sont également remarquables (Nord-Ouest, Nord-Est, Sud Est, Sud-Ouest). En général, la forme du bloc éducatif suit la forme de la parcelle du terrain ; l'orientation des ouvertures est par conséquent déterminée par l'implantation du bâtiment.
- **Protection** : les fenêtres des salles de classe dans toutes les écoles analysées ne sont pas équipées de dispositifs de protection solaire. L'école BACHIR BEN NACER est la seule à disposer de stores extérieurs à bandes verticales au niveau de la façade Sud-Ouest. On trouve parfois des éléments saillants (brise-soleil) dans la façade, bien que leur rôle se limite à la décoration. En conséquence, les utilisateurs des salles de classe ont essayé de recourir à d'autres moyens pour se protéger des rayons solaires défavorables, tels que l'installation de rideaux à l'intérieur, la peinture des vitres ou le recouvrement des fenêtres avec du papier. Ces solutions improvisées ont conduit à des salles de classe sombres et insuffisamment ce qui a entraîné l'utilisation de l'éclairage électrique durant la journée.
- **Dimensions** : l'analyse comparative a révélé que les plus grandes et les plus petites fenêtres se rencontrent dans les écoles les plus anciennes; le pourcentage de vitrage (fenêtres) par rapport aux murs de façade des salles de classe étudiées variait de 5% à 35%. Suivant leurs dimensions et le Ratio Fenêtres/Murs, les fenêtres ont été réparties en trois catégories: la première catégorie comprend les écoles avec un pourcentage inférieur à 10%. La deuxième catégorie concerne celles avec un pourcentage compris entre 10% et 20%. La troisième catégorie concerne les pourcentages supérieurs à 20%. En générale, une richesse et une diversité sont constatées dans le choix des formes et dimensions des fenêtres des écoles construites tout au long de la période post-indépendance jusqu'aux années 1990. Dans les

écoles construites au cours de cette période, les ratios d'ouverture sont variés des plus petites fenêtres (ratio inférieur à 10%) aux plus grandes fenêtres (ratios de 35%). Par contre, dans la période contemporaine, les ratios d'ouvertures les plus utilisés sont de l'ordre de 20%.

V.3.4 Ratios des fenêtres de la façade

Les tableaux d'analyse typologiques précédents renseignent sur la configuration des bâtiments scolaires et des salles de classe, ils fournissent également les caractéristiques des fenêtres en termes de propriétés formelles (telles que taille, forme, orientation, ... etc.) et matérielles (types de verre, présence de protection solaire). Considérant les objectifs de la présente recherche, les salles de classe ont été classées selon les valeurs des ratios d'ouverture qui ont été également calculés. Sur la base des ratios d'ouvertures examinés relativement aux salles de classe (Ratio Fenêtres/Murs), les fenêtres ont été réparties en trois catégories: la première catégorie regroupe des ratios d'ouverture inférieurs à 10%. La deuxième catégorie concerne des fenêtres avec un ratio compris entre 10% et 20%. La troisième catégorie admet les ratios supérieurs à 20%. En outre, les CEM et les lycées analysés à Biskra ont été classés en fonction de ces trois ratios d'ouverture. Il est apparu que:

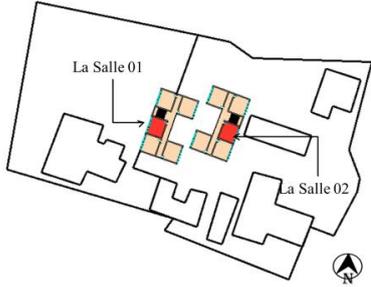
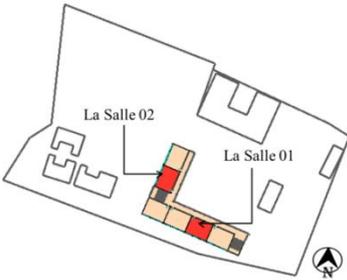
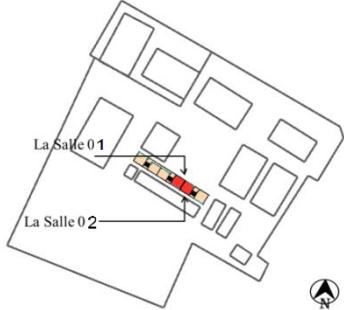
- 30% des écoles étudiées avaient un ratio d'ouverture inférieur à 0.1 (10%).
- 60% des écoles étudiées avaient un ratio d'ouverture compris entre 0.1 et 0.2.
- 10% des écoles étudiées avaient un ratio d'ouverture supérieur à 0.2.

Ainsi, le deuxième groupe qui comprend les écoles avec un ratio d'ouverture compris entre 0.1 et 0.2 est le plus dominant. Il représente 60% du total des établissements scolaires étudiés, en raison du grand nombre d'écoles de cette catégorie. Cette classification est clairement établie dans la gamme des ratios ouverture rencontrés dans les exemples examinés.

V.4 Protocole expérimentale

Après avoir analysé dix-huit établissements scolaires dans la ville de Biskra, ils ont été classés selon le ratio d'ouverture des fenêtres de leurs salles de classe ; ce qui a fait ressortir trois catégories principales d'écoles. Sur la base de cette catégorisation, trois écoles ont été sélectionnées pour servir de cas d'étude pour la prise de mesure in situ (Tableau V.6). Chaque exemple retenu représente une catégorie selon la valeur du ratio d'ouverture des fenêtres de leurs salles de classe.

Tableau V. 6 : Les 3 cas d'étude sélectionnées, Source : (Auteur, 2018)

	CEM GHAMRI HOUSSINE		LYCEE CHIKH MOHAMED KHEIREDDINE		CEM BACHIR BEN NACER	
						
Ratio d'ouverture	Ratio d'ouverture petit $R < 0.1$ R : 0.09		Ratio d'ouverture Moyen $0.1 < R < 0.2$ R : 0.15		Ratio d'ouverture grand $R < 0.2$ R : 0.35	
Typologie	Plan à coursive		Plan à coursive		Plan à coursive	
Type d'ouverture	unilatérale		bilatérale		bilatérale	
Nombre des murs Extérieurs	2		2		2	
Localisation	Dernier étage		Dernier étage		Dernier étage	
Codification des salles	S.PR1	S.PR2	S.MR1	S.MR2	S.GR1	S.GR2
Orientation	N-O	S-E	N-E/S-O	N-O/S-E	N-E/S-O	N-E/S-O

Ainsi, le premier cas d'étude « CEM GHAMRI HOUSSINE » représente les établissements avec un pourcentage d'ouverture inférieur à 10%. Le deuxième cas d'étude le « lycée CHIKH MOHAMED » KHEIREDDINE représente les établissements avec un pourcentage d'ouverture compris entre 10% et 20%. Et le troisième cas d'étude le « CEM BACHIR BEN NACER » représente les établissements dont le pourcentage d'ouverture est supérieur à 20%. Le tableau V.6 présente les trois cas d'étude sélectionnés, selon leurs caractéristiques architecturales, notamment, l'orientation et la situation des salles de classe dans l'étage ainsi que le nombre de murs extérieurs. Pour chaque école, deux salles de classe seront étudiées, ces dernières sont parfaitement identiques sauf pour l'orientation. L'annexe C détaille les plans et les façades des trois écoles choisies (Annexe C).

V.4.1 Mesures effectuées

Pour caractériser l'environnement lumineux à l'intérieur des salles de classe, les mesures ont porté sur l'évaluation des niveaux de l'éclairage intérieur en plusieurs points d'un plan de travail situés à une hauteur de 75cm qui correspond à la hauteur d'une table ou d'un bureau. Parallèlement, le niveau de l'éclairage extérieur global a été mesuré sur un plan horizontal complètement exposé dans la cour de l'école.

En ce qui concerne l'évaluation des conditions de confort thermique à l'intérieur des salles de classe, les mesures ont porté sur la température ambiante intérieure et extérieure, l'humidité relative intérieure et extérieure ainsi que la vitesse de l'air.

V.4.2 Choix des points de mesure

La prise des mesures des niveaux d'éclairements s'est faite relativement à un ensemble de points de référence situés à la hauteur de 75cm du niveau du sol (plan de travail), ce qui correspond à la hauteur des tables des élèves. Conventionnellement, les points de référence sont définis selon une grille de mesure orthogonale (imaginaire) recouvrant le plan de travail. La forme du quadrillage de la grille ressemble de préférence à un carré, le nombre de points est calculé selon la norme (EN.2464-2), le rapport de la longueur à la largeur d'une unité de la grille doit être maintenu entre (0.5 m et 2 m). Selon le protocole de mesure adopté, la grille de mesure de l'éclairage naturel a été définie selon 20 points de référence situés à une hauteur de 75 cm (Figure V.3). À cet effet, la surface de la salle de classe a été divisée en plusieurs rectangles de dimensions égales, les points de mesures sont situés au centre de chaque rectangle. La taille de la grille est calculée selon l'équation suivante :

$$P = 0.2 \times 5^{\log d} \quad (\text{eq : V.1})$$

Où:

d : est la dimension la plus longue de la zone en (m), si le rapport du côté le plus long au côté le plus court est inférieur à 2, sinon on prend **d** est la dimension la plus courte de la zone.

P : est la taille maximale des cellules de la grille en m.

La valeur de P doit être : $P \leq 10$ m

D'autre part, les mesures de température de l'air, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air ont été effectuées selon le standard (ASHRAE 55, 2010), soit au centre de la salle de classe à une hauteur de 1 m du sol. Les mesures extérieures ont été prises dans une zone ombragée de la cour à la même hauteur (1m du sol).

V.4.3 Instrument utilisés et déroulement des prises de mesures

L'instrument utilisé pour la prise de mesures est un anémomètre Testo 480, c'est un outil de mesure multifonctionnel équipé par des sondes digitales intelligentes avec une mémoire intégrée qui permet à l'utilisateur d'enregistrer, d'analyser et de documenter tous les paramètres pertinents du climat et de de l'air intérieur avec un seul appareil. Le (Tableau V.7) présente les caractéristiques techniques ainsi que le degré de précision de chaque sonde de mesure.

Tableau V. 7 : Caractéristiques techniques de l'appareil anémomètre Testo 480 et des sondes utilisées pour les prises de mesures. Source : (Fiche des données techniques de l'appareil).

Le thermo-anémomètre	Sonde d'humidité et de température	le capteur de l'air	Sonde Lux pour la mesure de l'intensité lumineuse
			
Testo 480 – Mesurer tous les paramètres climatiques importants avec un seul appareil	Etendue: 0 ... 100 % HR,-20 ... +70 °C Précision : ± 2 % HR (+2...+98% HR) ± 0.3 °C	Etendue: 0,2m/s à 3,1m/s – 3,1m/s à 35m/s. Précision : ± (0.2 m/s + 1 % v.m.)	Etendue: 0...+100.000 Lux Précision : ±5% ±10d

Les mesures thermiques et lumineuses ont été effectuées pendant trois jours consécutifs de la saison froide soient les (20, 21 et 22 Décembre 2017) qui représentent le solstice d'hiver. De même, trois jours soient les (26, 27 et 28 Juin 2018) ont été sélectionnés, pour effectuer les mesures durant la saison chaude ; les jours choisis sont considérés comme les plus chauds de l'année scolaire à Biskra. Les mesures ont été prises en l'absence des élèves pendant les heures habituelles des cours, soient de 08h00 h à 10h00, de 10h00 à 12h00, et de 14h00 à 16h00, avec une durée d'environ 15 minutes pour chaque mesure. Le ciel était clair et ensoleillé, l'éclairage artificiel ainsi que les systèmes de chauffage, de climatisation et de ventilation ont été éteints, la porte et les fenêtres ont été fermées.

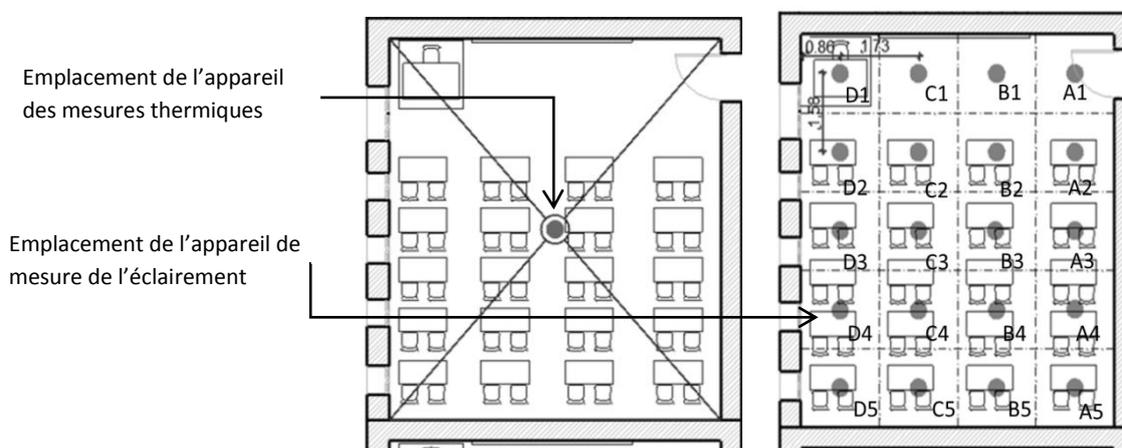


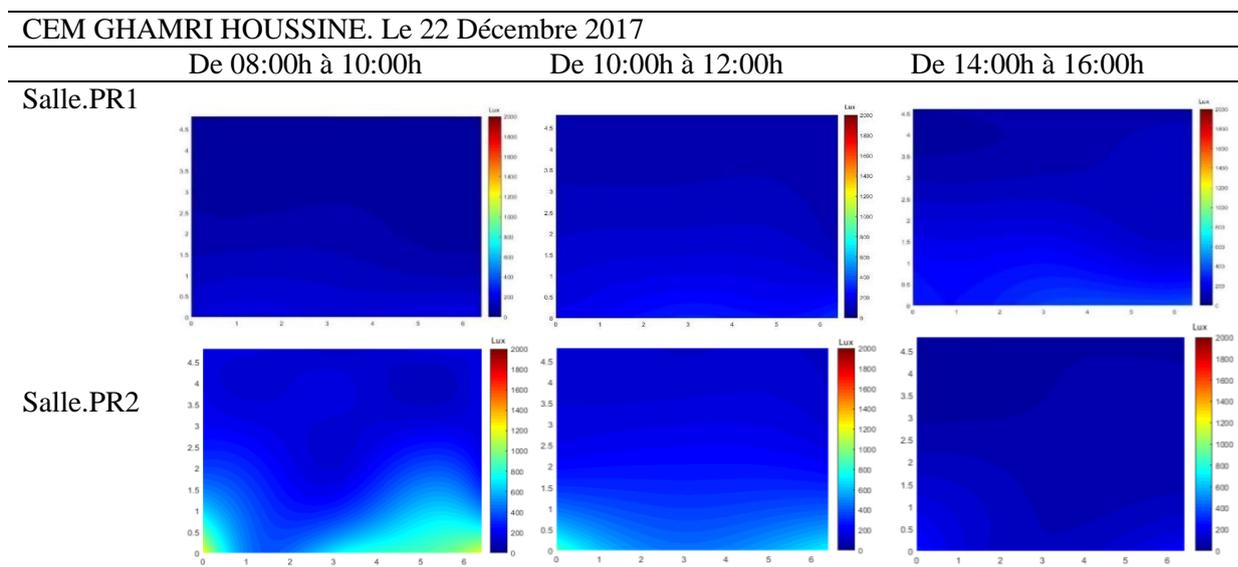
Figure V. 3 : Grille des points des mesures thermiques et lumineuses dans une salle de classe, Source : (Auteur, 2019)

V.5 Interprétation des résultats de de la campagne de mesures

Considérants les trois écoles choisies comme cas d'études et après avoir désigné deux salles de classes par bâtiment, une série de mesures lumineuses et thermiques ont été effectuées pour évaluer la performance de différents ratios d'ouvertures avec différentes orientations pour les salles de classe, et ce, pendant la saison chaude et la saison froide.

V.5.1 Évaluation de l'environnement lumineux

Une fois la campagne de prise de mesure terminée, les données collectées ont été dessinées à l'aide du logiciel MATLAB. Le tableau V.8 illustre la répartition des éclairagements intérieurs dans les salles de classe étudiées, pendant la saison chaude et la saison froide.



Il y a un éclairage diffus et uniformément réparti durant la journée, mais l'intensité est très faible. Les valeurs enregistrées sont toutes inférieures à 100 lux dans la salle S.PR1, qui a des fenêtres orientées Nord-Ouest. Cette salle nécessite un éclairage électrique toute la journée, ce qui consomme plus d'énergie. En revanche, la salle S.PR2 qui fait face au Nord-Est bénéficie d'un éclairage matinal adéquat mais d'une mauvaise uniformité. Il y a eu plusieurs contrastes remarquables au niveau du plan de travail sous les fenêtres, ce qui peut provoquer un éblouissement au niveau des tables. L'éclairage de l'après-midi dans les deux salles est très faible, avec des valeurs inférieures à 50 Lux.

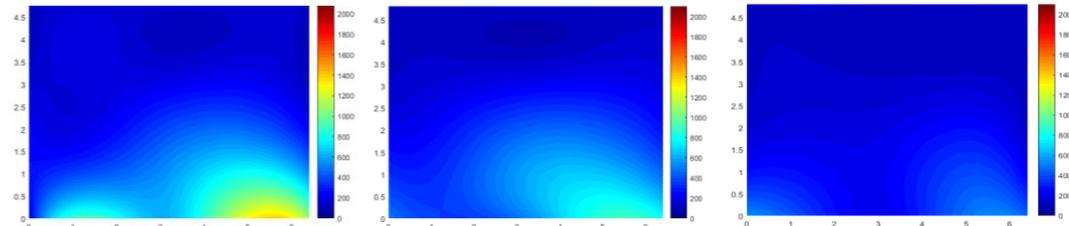
CEM GHAMRI HOUSSINE. Le 27 juin 2018.

De 08:00h à 10:00h	De 10:00h à 12:00h	De 14:00h à 16:00h
--------------------	--------------------	--------------------

Salle.PR1



Salle.PR2



Le matin, la salle S.PR1 bénéficie d'un éclairage diffus et uniforme, et le rendu des couleurs est acceptable, mais la quantité de lumière naturelle qui pénètre à l'intérieur de l'espace reste insuffisante. L'éclairage de l'après-midi est intense, provoquant un déséquilibre dans la répartition de la lumière sur les zones de travail; l'uniformité est assez faible à cette période de la journée. L'éclairage de la salle S.PR2, qui fait face au Sud-Est, est suffisant le matin, mais avec de forts contrastes dans le plan de travail, car l'uniformité est faible de 0.27. De plus, après 10h du matin et jusqu'à l'après-midi, le soleil change sa position et l'éclairage devient plus faible.

V.5.2 Évaluation des conditions thermiques

Des mesures de températures intérieures et extérieures, de l'humidité relative et de la vitesse de l'air, ont été effectuées durant les mêmes journées de la campagne de mesures de l'éclairage naturel, soient les 20, 21 et 22 Décembre 2017 pour la saison froide et les 26, 27 et 28 Juin 2018 pour la saison chaude. Les prises de mesures ont eu lieu dans les mêmes salles et dans le même ordre. Cette partie du travail de terrain vise l'évaluation de l'impact combiné des différents ratios d'ouverture et de l'orientation sur les gains thermiques dans les salles de classe. Le tableau V.9 ci-dessous fournit les résultats des mesures in situ des conditions thermiques.

Tableau V. 8 : Les mesures thermiques dans les salles de classe. Source : (Auteur, 2019)

CEM GHAMRI HOUSSINE. Le 21 Décembre 2017						
Temps	Salle.PR1			Salle.PR2		
	08h - 10h	10h - 12h	14h - 16h	08h - 10h	10h - 12h	14h - 16h
T ambiante intérieure C°	14	14.9	15.3	14.2	14.7	14.9
H relative intérieur %	43.6	49.1	47	46.2	46	46.6
Extérieur, Le 21 Décembre 2017						
Temps	08h - 10h		10h - 12h		14h - 16h	
T ambiante extérieure C°	12		13.5		17	
Humidité relative Ext %	58		51		45	
Vitesse de l'air Ext m/s	0.4		0.9		0.9	

La salle S.PR1 qui fait face à Nord-Ouest a des valeurs de température supérieures à celles dans la salle S.PR2 qui fait face à Sud-Est. Pendant la matinée, les températures intérieures sont supérieures à la température extérieure, ce qui s'explique par une faible pénétration de gains de chaleur. Le changement de température dans les deux salles de classe reste très faible pendant la journée, ce qui indique une bonne inertie thermique des parois extérieurs. L'humidité relative change inversement avec la température de l'air. Par conséquent, les valeurs de la température de l'air et de l'humidité relative dans les deux salles de classe de cette école sont considérées thermiquement inconfortables.

CEM GHAMRI HOUSSINE, Le 27 Juin 2018						
Temps	La salle 01			La salle 02		
	08h - 10h	10h - 12h	14h - 16h	08h - 10h	10h - 12h	14h - 16h
T ambiante intérieure C°	31.5	32.6	34.3	32	32.2	35.3
H relative intérieur %	31	29.8	20.4	29.9	29.2	20.1
Extérieur, Le 27 Juin 2018						
Temps	08h - 10h		10h - 12h		14h - 16h	
T ambiante extérieure C°	31.1		32.2		36.4	
Humidité relative Ext %	32.5		29.9		19.3	
Vitesse de l'air Ext m/s	1.4		1.6		1.7	

La lecture des résultats montre que la température extérieure est inférieure aux températures intérieures le matin. L'après-midi, la température intérieure devient plus élevée qu'à l'extérieur. Il convient également de noter que la salle S.RP2 est plus chaude que la S.RP1 et que les deux salles de classe sont chaudes et inconfortables. De plus, l'humidité relative est très faible le matin, elle se dégrade jusqu'à 20% l'après-midi.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description du travail de terrain réalisé sur des exemples représentatifs d'établissement scolaires de type CEM et lycées situés dans la ville de Biskra. L'objectif étant d'évaluer l'environnement lumineux et les conditions thermiques dans des salles de classe qui se distinguaient principalement par des ratios d'ouverture et des orientations différents. L'étude qui a été consacrée à la prise des mesures in situ a, néanmoins, été précédée par une présentation des données climatiques du contexte de l'étude soit la ville de Biskra. Par la suite, une analyse typologique réalisée sur 18 écoles a mis en évidence deux typologies récurrentes caractérisant le bloc d'enseignement : le plan à coursive et le plan à corridor centrale. De plus, les résultats ont fait ressortir des valeurs allant de 5% à 35% pour les ratios d'ouverture des fenêtres des salles de classe ; ce qui a permis de classer les écoles étudiées en trois groupes. Sur la base de cette catégorisation, trois écoles ont été sélectionnées pour servir de cas d'étude pour la prise de mesures in situ. Chaque exemple retenu représente une catégorie selon la valeur du ratio d'ouverture des fenêtres de leurs salles de classe, soit respectivement :

salles de classe avec une surface réduite des fenêtres (ratio inférieur à 10%), celles avec une surface moyenne des fenêtres (ratio compris entre 10% à 20%), et enfin, les salles de classe avec une grande surface d'ouverture (ratio supérieur à 20%).

Avant d'entamer la campagne de mesure, les bâtiments sélectionnés comme cas d'étude ont été soigneusement décrits, et pour chacun d'eux, deux salles de classe d'orientation différentes ont été choisies pour faire l'objet de l'évaluation en termes d'éclairage naturel et de conditions thermiques. En outre, le protocole des prises de mesures a été élaboré et décrit. Enfin, l'évaluation in situ de la performance de l'éclairage naturel et du fonctionnement thermique des salles de classe a été effectuée. Les variables testées étaient le ratio d'ouverture des fenêtres des salles de classe et l'orientation, les mesures ont eu lieu en cours de l'année scolaire durant la période chaude et la période froide.

Considérant le premier volet de l'étude, consacré à l'évaluation de la performance lumineuse, les résultats ont montré que :

- Les salles de classe avec un grand ratio d'ouverture (plus de 20%) sont caractérisées par un éclairage généralement suffisant, et uniformément réparti dans la salle orientée vers le Nord-Est ; en contre partie, il est asymétriquement réparti dans la salle orientée vers le Sud-Ouest, avec un risque d'éblouissement et la présence d'une tâche solaire directe sur le plan de travail (tables près des fenêtres).
- Les salles avec un petit ratio d'ouverture (moins de 10%) se caractérisent par un éclairage très faible (moins de 300 Lux) pendant toute la journée. Cependant, l'éclairage est distribué de manière uniforme pendant la matinée dans la salle orientée Nord-Ouest, et de manière hétérogène dans la salle orientée Sud-Est durant toute la journée.
- Les salles avec un ratio moyen d'ouverture (entre 10 % et 20%) ont un éclairage suffisante, et l'uniformité était acceptable la matinée dans la salle s'ouvrant vers le Nord-Est / Sud-Ouest. En revanche, l'uniformité était assez faible dans la salle, présentant des ouvertures orientées Nord-Ouest / Sud-Est, de plus, des zones contrastées et un éclairage intenses ont accentué l'inconfort visuel l'après-midi.

À partir de ces résultats, il apparaît le ratio d'ouverture des fenêtres de la façade est déterminant en termes de quantité de lumière du jour dans l'espace. Les ratios moyens (entre 10 % et 20%) et grand (plus de 20%) se sont avérés les plus efficaces. En outre, pour la configuration du bloc d'enseignement, la typologie bilatérale est plus performante que la typologie unilatérale en termes d'uniformité de l'éclairage naturelle. L'orientation des ouvertures a également un effet

important sur la distribution de lumière dans les salles de classe. Enfin, il est important de signaler que dans certaines salles de classe, des tâches solaires sont apparues à des moments précis de la journée, ce qui nécessite de les équiper avec des protections solaires.

Le deuxième volet de l'investigation sur terrain a été consacré à l'évaluation des conditions du confort thermique, les mesures ont été effectuées dans le respect du protocole élaboré à cet effet : les mêmes salles de classe ont été utilisées et dans les mêmes conditions que pour les précédentes ; les mesures ont eu lieu en cours de l'année scolaire durant la saison froide et la saison chaude, les ouvertures étaient fermées, et les systèmes de chauffage et de climatisation étaient éteints. L'objectif étant également d'examiner la performance thermique dans différentes salles de classe se distinguant par différents ratios d'ouverture et orientations. L'étude a révélé les résultats suivants:

- Les températures étaient relativement basses en Hiver et trop élevées en Été, ce qui rendait toutes les classes analysées, thermiquement inconfortables. Les conditions thermiques caractérisant les salles de classe menues d'un grand ratio d'ouverture (plus de 20%) étaient plus froides que l'extérieur en Hiver, tandis qu'en Été, elles étaient sensiblement plus chaudes que l'extérieur. Ces constats sont le résultat des échanges de chaleur (pertes et gains) qui s'effectuaient au niveau de l'enveloppe et qui ont été accentués du fait des grands ratios d'ouvertures.
- D'autre part, les salles avec un petit ratio d'ouverture (moins de 10%) ont présenté des conditions thermiques plus stables que les précédentes ; de faibles fluctuations et un changement minime de température et d'humidité relative ont été enregistrés pendant la journée ainsi que pendant les deux périodes hivernale et estivale. Ce suppose qu'une inertie thermique adéquate est assurée au niveau de l'enveloppe.
- Enfin, les salles avec un ratio d'ouverture moyen (entre 10 % et 20%) ont enregistré des températures relativement basses en Hiver et assez élevées en Été ; ce qui indique que les conditions satisfaisantes de confort thermique ne sont pas réalisées.

Ce volet de l'étude expérimentale a, également, confirmé l'importance de l'orientation sur les conditions thermiques ; en général, les salles de classe orientées Nord/Sud sont plus froides que les salles orientées Est/Ouest.

*Chapitre VI : Etude paramétrique et
optimisation multi-objectifs*

Introduction

Ce dernier chapitre présente les étapes de l'étude paramétrique multicritères et l'optimisation effectuée sur la base d'une simulation numérique via le logiciel Rhino/Grasshopper. L'évaluation et l'optimisation portent sur l'impact du ratio d'ouverture dans les classes en considérant deux typologies des blocs d'enseignement et différentes orientations. La simulation a été précédée par la validation du modèle numérique, suivie d'une identification de l'effet des éléments architecturaux qui influencent le ratio d'ouverture, notamment : l'orientation, le type de vitrage, et la composition des parois de façade. L'objectif de cette étape est de bien comprendre la relation entre ces différents paramètres. L'étape suivante est consacrée à l'optimisation paramétrique multicritères à l'aide du plug-in Octopus afin de proposer la meilleure configuration de la fenêtre combinant tous les paramètres précédents en vue d'une performance optimale des façades des salles de classe sous les conditions d'un climat chaud et sec.

VI.1 Simulation paramétrique

Les méthodes numériques d'évaluation et d'optimisation des bâtiments ont connu des progrès significatifs ces dernières années. De nombreux logiciels ont été développés pour simuler la performance des bâtiments, notamment, en termes de confort thermique, visuel et d'efficacité énergétique. La présente étude est principalement basée sur l'utilisation du programme de conception paramétrique 'Honeybee & Ladybug' développés en tant que plug-ins de la plateforme graphique Grasshopper/Rhinocéros. Actuellement, cet éditeur d'algorithmes graphique est très populaire et largement utilisé dans le milieu du design, de l'architecture, de l'ingénierie et de la construction.

VI.1.1 Présentation du logiciel de simulation et des plug-ins exploités

Parmi les nombreux logiciels utilisés pour simuler les performances des bâtiments, cette étude a opté pour 'Grasshopper plug-in pour Rhinocéros 3D'. Rhinoceros 3D est un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur utilisé par exemple dans le milieu du design industriel ou de l'architecture, développé par Robert McNeel & Associates. Rhinoceros, enrichi de Grasshopper, est un modèleur 3D puissant qui sert essentiellement à concevoir des géométries dynamiques comme des architectures non-linéaires (toits de forme libre, les façades paramétriques ou les structures complexes). Il s'agit d'une plate-forme graphique qui se base principalement sur des codes visuels qui adopte des technologies de programmation informatique.

Outils de conception dynamique, il fait référence au processus de modélisation de la géométrie du bâtiment à l'aide des paramètres et des fonctions. Le concept paramétrique est créé en faisant glisser des composants sur un canevas, puis en connectant leurs sorties aux entrées des composants suivants. L'interface utilisateur se distingue par sa flexibilité dans la programmation et les paramètres, ainsi que par la facilité avec laquelle les relations entre les entrées et les sorties de données peuvent être modifiées. Ce qui le rendent plus convivial que les langages de programmation traditionnels (Fang, 2017). Rhino et Grasshopper est aussi un outil d'évaluation environnementale. En effet, un système riche en modules fonctionnant dans Rhino est prévu pour effectuer des analyses et des simulations en rapport avec le climat, les ambiances, la performance énergétique. Ainsi, les modules ou les scripts intégrés dans Rhino permettent d'effectuer des analyses météorologique, environnementale et énergétique en fonction du lieu ; ou encore des évaluations de la lumière naturelle, des conditions thermiques des espaces extérieurs et intérieurs, etc. (Roudsari et al., 2013).

Ladybug & Honeybee (Figure VI.1) fournissent un environnement et une boîte à outils d'analyse climatique pour Grasshopper 3D. Honeybee utilise un ensemble de logiciels de simulation intégrés, notamment Dayism et Radiance pour l'éclairage, Therm, EnergyPlus et OpenStudio pour l'énergie du bâtiment. Ladybug importe des fichiers climatiques EnergyPlus (* .epw) et fournit une variété de représentations graphiques des indicateurs tels que : les roses des vents, le rayonnement, les études d'ensoleillement. Les moteurs de simulation utilisés par Ladybug & Honeybee sont tous validés tels qu'EnergyPlus (US Département de l'Energie), Radiance (Ward, 2004) et Daysim (Reinhart et Walkenhorst, 2001)

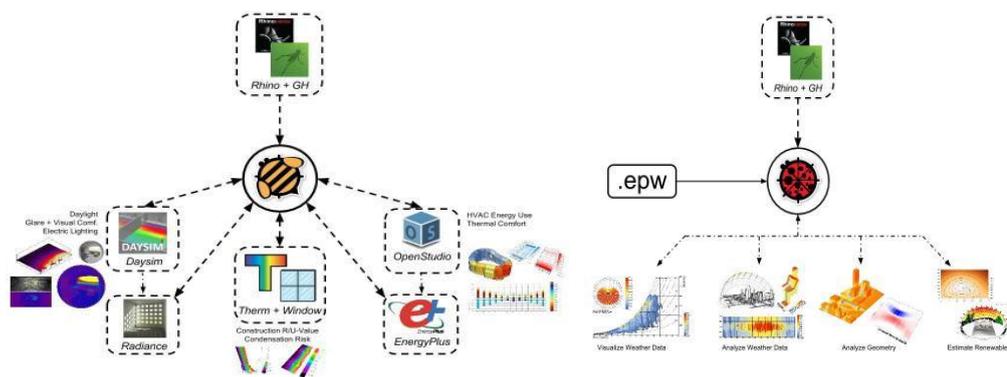


Figure VI. 1 : (A) Honeybee (B) Ladybug plug-ins pour grasshopper 3D. (Source: <https://parametricmonkey.com>)

VI.2 Validation lumineuse et thermique du modèle numérique

L'école CEM GHAMRI HOUSSINE qui a servi pour la prise des mesures thermiques et lumineuses a été utilisée pour la validation du modèle numérique. Le bâtiment a été modélisé sur la base des documents graphiques nécessaires à cet effet (Voir Annexe B, École 04), ensuite des simulations ont été opérées dans les mêmes conditions et les mêmes jours que ceux des prises de mesures.

Le modèle numérisé reproduit le bloc d'enseignement en forme de U de l'école. C'est un bâtiment à rez-de-chaussée plus un étage (R+1) faisant face au Nord à 21 degrés. Les salles de classe disposent de fenêtres sur une seule façade avec un ratio de 09%. La salle de classe choisie est située au premier étage, Le modèle a été créé à l'aide du logiciel 'Grasshopper & Rhino3D' comme le montre la figure VI.2. Les dimensions de la salle de classe sont 7.90 m, 6.88 m et 3.8 m respectivement pour la longueur, largeur, et hauteur.

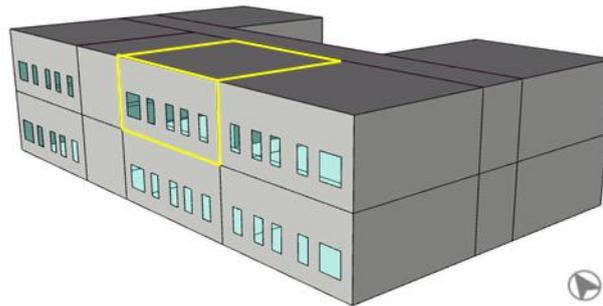


Figure VI. 2 : Modélisation sous Grasshopper & Rhino3D du bloc d'enseignement de l'école devant servir à l'étude paramétrique. Source : (Auteur, 2019).

Le logiciel Grasshopper/Rhino a été utilisé pour créer le modèle lumineux. Ainsi, Rhinoceros 3D a été utilisé pour dessiner les surfaces du bâtiment, tandis que Grasshopper a permis de définir les matériaux de l'enveloppe du bâtiment. L'erreur de biais statistique moyenne (MBE), l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et le coefficient de variation de RMSE, (CV (RMSE)) sont des équations utilisées pour évaluer l'erreur entre les valeurs prédites (simulées) et celles mesurées, les valeurs d'erreur faibles correspondent à un étalonnage supérieur. L'erreur de biais moyenne (MBE) et l'erreur quadratique moyenne CV(RMSE) ont été respectivement calculées à l'aide des équations (eq. VI.1) et (eq. VI.2) :

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n M_i} (\%) \quad (\text{eq VI. 1})$$

$$CV(RMSE) = \frac{1}{\bar{y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - S_i)^2}{n}} (\%) \quad (\text{eq VI. 2})$$

Où : M_i et S_i sont les données mesurées et simulées par rapport à l'intervalle de temps I ,
 n est le nombre total de valeurs de données utilisées pour le calcul,
 \bar{y} est la valeur moyenne des données mesurées.

Selon ASHRAE standard 14-2014, le modèle de simulation énergétique et thermique est considéré comme calibré si les valeurs horaires de MBE sont comprises entre $\pm 10\%$ et les valeurs de CV horaire (RMSE) sont inférieures à 30%. Tandis que pour les valeurs mensuelles de MBE, l'erreur admise est comprises entre $\pm 5\%$ des valeurs mensuelles, et les valeurs de CV mensuelle (RMSE) sont inférieures à 15%. Pour la validation de l'éclairage, et de fait qu'il n'y a pas un standard établi, les recommandations données par la littérature existantes sur la lumière du jour ont été exploitées comme indiqué ci-dessous.

VI.2.1 Validation du modèle lumineux

Le calcul pour l'estimation de l'éclairage a été réalisée en prenant les mêmes conditions climatiques des mesures sur le terrain, de ce fait, deux jours représentatifs de la saison froide et de la saison chaude -soit respectivement le 21 décembre et le 27 Juin- ont été choisis dans le fichier climatique de Biskra et utilisés pour les calculs. En outre, les tests de simulation ont été effectués selon le même mode de prise de mesures, soit trois fois par jour pendant les heures de cours à : 08:00h, 10:00h et 14:00h. Le ciel est clair et ensoleillé, la lumière artificielle éteinte et les fenêtres fermées sans présence d'une protection solaire. Les valeurs de réflexion des matériaux ont été estimées pour correspondre aux couleurs réelles de la salle de classe prise comme référence, et en cohérence avec la Norme européenne de conception d'éclairage des bâtiments NF EN 12464-1. Les facteurs de réflectance du sol, des murs intérieurs et des plafonds pour le modèle de simulation ont été estimés 0.4, 0.67 et 0.8 respectivement. Une grille de (20 points) situés à une hauteur de 75 cm a été déterminée pour faciliter la comparaison avec les valeurs des mesures in situ (Voir Chapitre V.4.2). Les tableaux VI.1 & VI.2, visualisent les valeurs de l'éclairage obtenues par simulation et les comparent avec celles mesurées.

Ainsi, pendant la journée d'Hiver (Tableau. VI.1), les moyennes des valeurs de l'éclairage intérieur calculées par simulation ont été trouvés comme suit: à 08:00h: 104.72 lux, à 10:00h: 168.27 lux, à 14:00h: 211.39 lux. Alors que les moyennes des valeurs de l'éclairage intérieur correspondantes selon les mesures in situ, étaient : à 08:00h: 89.75 lux, à 10:00h: 138.9 lux, et à 14:00h: 166.7 lux. Il est évident que les valeurs des éclairages moyens calculées par la simulation sont supérieures à celles obtenues par les mesures sur le terrain.

Tableau VI. 1 : Visualisation de la distribution des éclairagements sur le plan de travail et comparaison entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées, Le 21 Décembre 2018. Source : (Auteur, 2020)

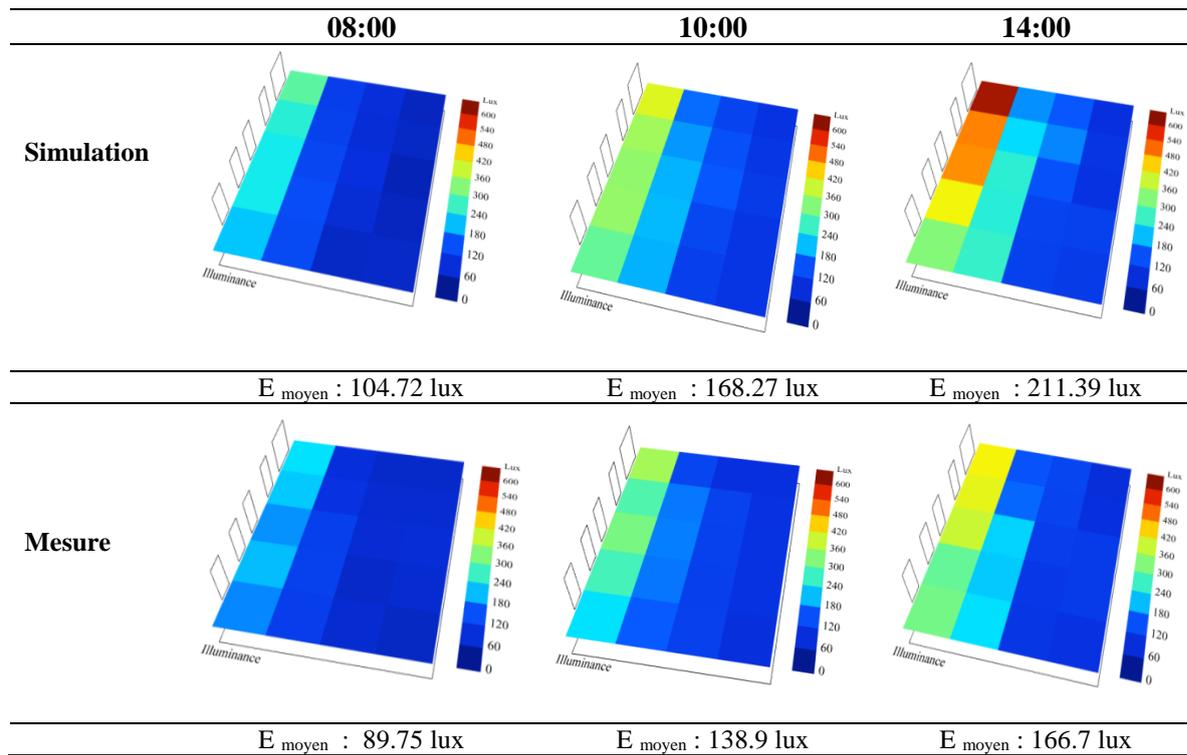
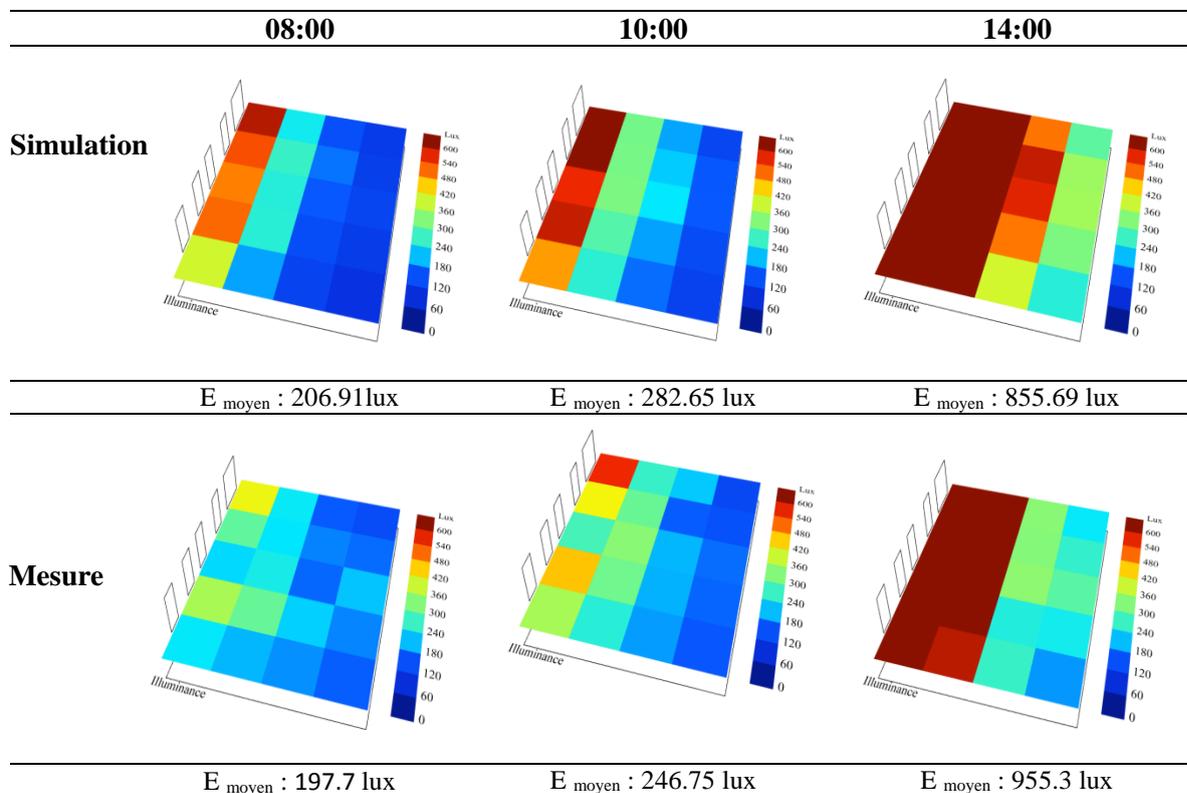


Tableau VI. 2 : Visualisation de la distribution des éclairagements sur le plan de travail et comparaison entre les valeurs simulées et les valeurs mesurées, Le 27 Juin 2018. Source : (Auteur, 2020)



De même, pendant la journée d'Été (Tableau. VI.2), les moyennes des valeurs de l'éclairage intérieur calculées par simulation ont été les suivantes : à 08:00h: 206.91 lux, à 10:00h: 282.65 lux, à 14:00h: 855.69 lux. En contre partie, les moyennes des valeurs mesurées in situ de l'éclairage intérieur étaient respectivement: à 08:00h: 197.7 lux, à 10:00h: 246.75 lux, à 14:00h: 955.3 lux. Les valeurs des éclairages moyens obtenues par simulation sont généralement supérieures à celles enregistrées sur le terrain.

Pour une comparaison plus approfondie entre des valeurs obtenues par simulation et les valeurs des mesures réelles, d'autres calculs d'erreur ont été effectués. Notamment, calculé le coefficient de variation de l'erreur quadratique moyenne comme mentionné dans ASHRAE 14-2014, CV(RMSE) et le MBE. Ces deux indicateurs ont été utilisés pour les comparaisons de l'éclairage entre les données mesurées et simulées. Après avoir effectué les calculs selon les équations (eq. VI.1) et (eq. VI.2), MBE et CV(RMSE) ont été trouvés respectivement équivalents à : -19.57 % et 26.01 % pour le jour d'hiver, et -16.10 % et 28.79% pour le jour d'été.

Il est nécessaire de se référer à plusieurs études pour extrapoler la marge d'acceptation d'erreur de validation de l'éclairage. Malheureusement, la précision ciblée par la recherche concernant l'éclairage naturel est rarement signalée, ce qui rend difficile la détermination de la marge d'erreur admissible. Cependant, des études antérieures sur l'évaluation de l'éclairage naturel ont admis que des erreurs de simulation de 20 à 30 % ont été considérées comme acceptables. Par exemple, des erreurs de validation de radiance allant jusqu'à 20 % ont été signalées par Ng et al. (2001), tandis que C. F. Reinhart and Andersen (2006) ont accepté une erreur de 20 % dans les résultats de la simulation de la lumière du jour. Ceci a également été jugé acceptable par McNeil and Lee (2013) et Christoph Reinhart and Breton (2009) qui ont rapporté que des valeurs typiques de MBE et de RMSE de 28 % et 31 % respectivement étaient tolérables.

D'autre part, l'utilisation de techniques avancées de modélisation et de mesure a réduit l'erreur, comme l'ont constaté CF Reinhart and Walkenhorst (2001), avec une plage de MBE comprise entre 8 et 17 %, tandis que le RSME variait de 24 à 40 %. Dans le même contexte, Yoon et al. (2016) ont constaté que pour les mesures de l'éclairage CV(RMSE) sur le plan de travail variait de 25.36 % à 42.05 %. Selon Merghani and Bahloul (2016), une erreur de biais moyenne (MBE) de 20 % et une erreur quadratique moyenne (RMSE) de 32 % dans les simulations d'éclairage sont considérées comme acceptables.

Concernant la présente étude les valeurs trouvées pour MBE pour les mesures d'Hiver et d'Été correspondaient respectivement à -19.57 % et -16.10 % ; et celles de CV(RMSE) pour les mesures d'Hiver et d'Été étant respectivement 26.01 % et 28.79 %, ces valeurs sont comparables à celles des études mentionnées ci-dessus. Les marges d'erreurs ont donc été considérées comme acceptables, en particulier compte tenu du potentiel d'erreur dû aux mesures de terrain limitées et à l'adaptation des paramètres de modélisation aux conditions réelles (par exemple, conditions du ciel, configuration et spécification des matériaux).

Un examen plus approfondi des données a montré qu'il y avait un certain biais en faveur de la surestimation, c'est-à-dire que les valeurs d'éclairement simulées dépassent presque toujours les valeurs mesurées, ce qui aura un certain effet sur les résultats d'optimisation. Cependant, ce biais a été considéré comme acceptable pour les raisons suivantes: les valeurs simulées de l'éclairement sont calculées instantanément par le logiciel, tandis que, les valeurs enregistrées sur terrain correspondent à des mesures effectuées pendant environ 15 minutes. De plus, l'état du ciel, la transmittance visible du verre et la réflectance des matériaux utilisés dans la simulation pourraient avoir provoqué certains biais même si toutes les précautions ont été prises pour se rapprocher le plus possible de la réalité.

VI.2.2 Validation du modèle thermique

Les mesures thermiques ont été effectuées dans les mêmes conditions que celles de l'éclairement et pendant les mêmes jours (21 décembre et 27 juin 2018). Rappelons, que les fenêtres sont à vitrage simple et clair sans protection solaire. Les matériaux choisis pour effectuer les tests de simulation ressemblent par leurs propriétés à ceux couramment utilisés dans l'aire d'étude (Biskra). Le fichier de données climatiques de la ville de Biskra disponible au format (*epw) a été utilisé selon les données météorologiques couvrant la période (2003-2017). La simulation thermique a été réalisée à l'aide de Ladybug & Honeybee après avoir renseigné et introduit tous les détails nécessaires au calcul des mesures thermiques, notamment, le nombre de personnes par surface au sol a été fixé à 0.03ppl/m² représentant l'absence d'élèves ; les systèmes HVAC ont été éteints et les portes et fenêtres ont été fermées pendant la simulation. Les caractéristiques des matériaux de l'enveloppe sont détaillées dans le tableau ci-dessous (Tableau. VI. 5).

Tableau VI. 3 : Caractéristique des matériaux de l'enveloppe du bâtiment. Source: (DTR C 3-2 1997 Documentation Technique Réglementaire du Ministère du Logement, Algérie)

Elements du bâtiment	Matériaux	Epaisseur (m)	valeurs U (W/m ² -K)	Capacité thermique totale (J/kg K)
----------------------	-----------	---------------	---------------------------------	------------------------------------

Mur extérieur		1.10	848.31
	Revêtement extérieur en ciment	0.02	
	Brique creuse	0.15	
	lame d'air	0.05	
	Brique creuse	0.15	
	Enduit de plâtre intérieur	0.015	
Mur intérieur		2.51	833.33
	Enduit de plâtre	0.015	
	Brique creuse	0.15	
	Enduit de plâtre	0.015	
Planchers intermédiaires		3.65	882.62
	Sol	0.02	
	Mortier	0.03	
	Dalle de compression	0.04	
	Brique creuse	0.2	
	Plâtre intérieur	0.015	
Dalle de sol		5.68	1060
	Dalle de compression	0.1	
	Mortier	0.03	
	Sol	0.02	
Toiture		0.72	947.46
	Etanchéité	0.03	
	Forme de pente	0.04	
	Isolation	0.04	
	Dalle de compression	0.04	
	Brique creuse	0.2	
	Enduit de plâtre intérieur	0.015	

Les graphes ci-dessous permettent une comparaison entre les températures mesurées sur terrain (a) et les températures simulées (b), il s'agit des températures l'air intérieures et extérieures pendant une journée de la période froide (figure VI.3) et une journée de la période chaude (figure VI.4).

Les courbes de températures illustrées dans les figures VI.3 et VI.4, permettent de procéder à une comparaison visuelle des températures mesurées et simulées. Ainsi, les valeurs de température intérieure mesurées (T_{a-M}) varient de 14°C à 15.3°C en Hiver et de 31.5°C à 34.3°C en Été. Par contre, les valeurs de température intérieure simulées (T_{a-Sim}) enregistrent entre 14.35°C à 17.56°C en Hiver et de 31.55°C à 33.70°C en Été. La plage des différences entre les mesures in situ et les résultats des simulations est estimée entre 0.05°C et 2.26°C , avec une plage de pourcentage de 0.14% à 6.58% , ce qui ne dépasse pas 10% .

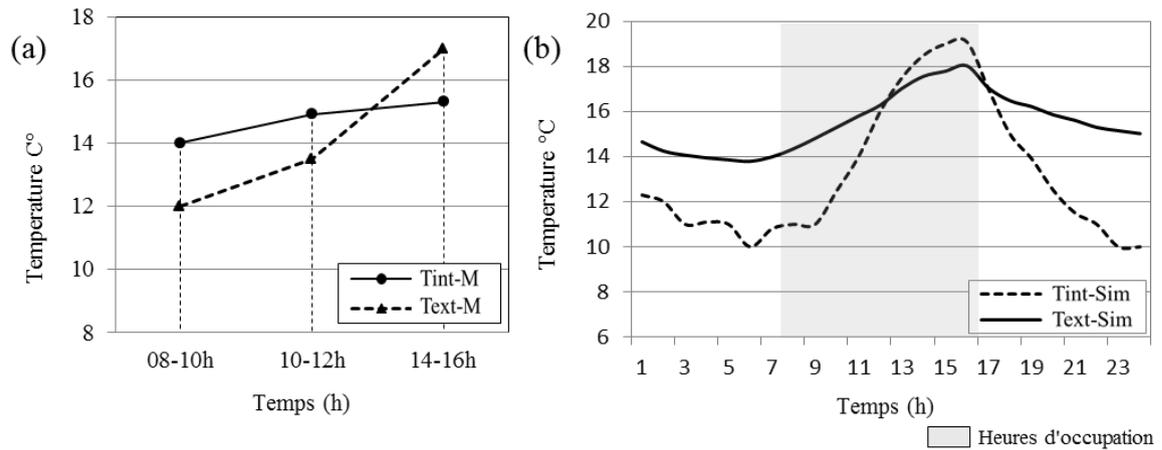


Figure VI. 3 : Comparaison entre les températures mesurées (a) et simulées (b), pendant le jour d’hiver. (Source : Auteur, 2019).

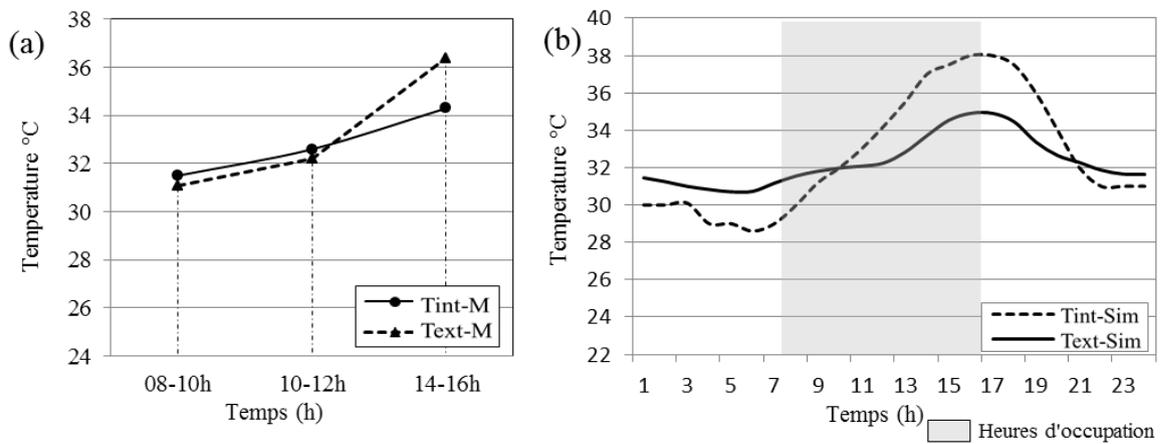


Figure VI. 4 : Comparaison entre les températures mesurées (a) et simulées (b), pendant le jour d’été. Source : (Auteur, 2019).

Une comparaison a été également effectuée entre les températures extérieures (Text-M et Text-Sim) en hiver et en été. Pendant l'hiver, les températures extérieures variaient de 12 °C à 17 °C pour les mesures et entre 11 °C et 18.5 °C pour les simulations. Pendant l'été, les températures extérieures variaient de 31.1 °C à 36.4 °C pour les mesures, et entre 30 °C et 38°C pour les simulations. Par conséquent, un écart de 0.1°C à 1.6 °C, a été trouvé, ce qui correspond à 0.26% pour Text d’Hiver et à 4.21% pour Text d’Été. Ces chiffres représentent un biais inférieur à 10%. En conséquence, le modèle thermique pouvait être validé.

Pour la validation thermique plus précise, le MBE et le CV(RMSE) ont été calculés sur la base de la moyenne des résultats simulés sur deux heures (par exemple, correspondant au point de mesure 08-10h, ainsi que 10-12h et 14-16h). La figure 6.4 illustre la comparaison entre les températures intérieures et extérieures mesurées et simulées pour les journées représentatives d'hiver et d'été.

Ainsi, pour la journée d'hiver, MBE et CV(RMSE) des températures intérieures ont été trouvés respectivement 1.8 % et 2.1 %, tandis que MBE et CV(RMSE) des températures extérieures étaient respectivement -3.9 % et 7 %. Pour la journée d'été, les calculs de MBE et CV(RMSE) des températures intérieures ont donné respectivement 0.1 % et 1.1 %, tandis que MBE et CV(RMSE) des températures extérieures étaient respectivement 0.5 % et 1.1 %. Selon ASHRAE-14 2014, le modèle thermique et de simulation est considéré comme calibré si les valeurs horaires de MBE sont à ± 10 % et les valeurs de CV (RMSE) horaires sont inférieures à 30 %. Considérant que les valeurs obtenues pour MBE et CV(RMSE) sont situées dans la plage acceptable d'erreur, le modèle thermique pouvait par conséquent être validé.

Une validation des résultats de consommation d'énergie n'a pas été possible, car les données de consommation d'énergie n'étaient pas disponibles. Cependant, le fait que la consommation d'énergie soit calculée sur la base des conditions thermiques et lumineuses, qui avaient été validées, en combinaison avec des profils d'occupation et d'utilisation qui restent constants, cela est largement suffisant pour garantir la précision relative des valeurs de consommation d'énergie. Bien sûr, il peut y avoir un biais inconnu dans les résultats, de sorte que les valeurs de l'intensité d'utilisation de l'énergie (EUI) considérées dans la présente étude ne doivent pas être traitées comme des résultats absolus mais plutôt être utilisées comme un indicateur relatif de la consommation d'énergie ; c'est-à-dire qu'une EUI plus élevée indique une consommation d'énergie plus élevée. Les résultats de simulation de la consommation énergétique restent donc compatibles avec l'approche de l'algorithme génétique qui vise à minimiser les valeurs EUI. En conclusion, le modèle est en mesure de générer des résultats acceptables pour les conditions thermiques et de lumière du jour, sans autre étalonnage, et de fournir des valeurs de performances énergétiques relatives utiles pour l'optimisation.

.

VI.3 Approche paramétrique et optimisation multicritère

Une fois le modèle numérique validée, l'étape suivante consiste à étudier l'impact de certains paramètres affectant le ratio d'ouverture des fenêtres dans les salles de classe sous les conditions chaudes et arides. L'objet de l'étude est un bloc pédagogique généré principalement sur la base des résultats issus de l'analyse typologique des écoles sélectionnées dans la ville de Biskra, ainsi

que des recommandations générales pour la conception des écoles fournies par le Ministère de l'Éducation Nationale.

Comme illustré dans la figure VI.5, l'étude paramétrique se déroulera selon trois étapes : dans la première une comparaison de la performance lumineuse, thermique, et énergétique entre deux typologies différentes (unilatérale et bilatérale), sera effectuée. Dans la deuxième étape, il s'agira d'évaluer l'impact des éléments architecturaux qui influencent le ratio d'ouverture des fenêtres, tels que l'orientation, le type de vitrage, la protection solaire et la composition de la paroi, en termes de performance lumineuse, thermiques, et énergétique. Le but de cette étape est de bien comprendre la relation entre les différents paramètres considérés. Enfin, la troisième étape sera consacrée au processus d'optimisation paramétrique du ratio d'ouverture des fenêtres des salles de classe pour les deux typologies.

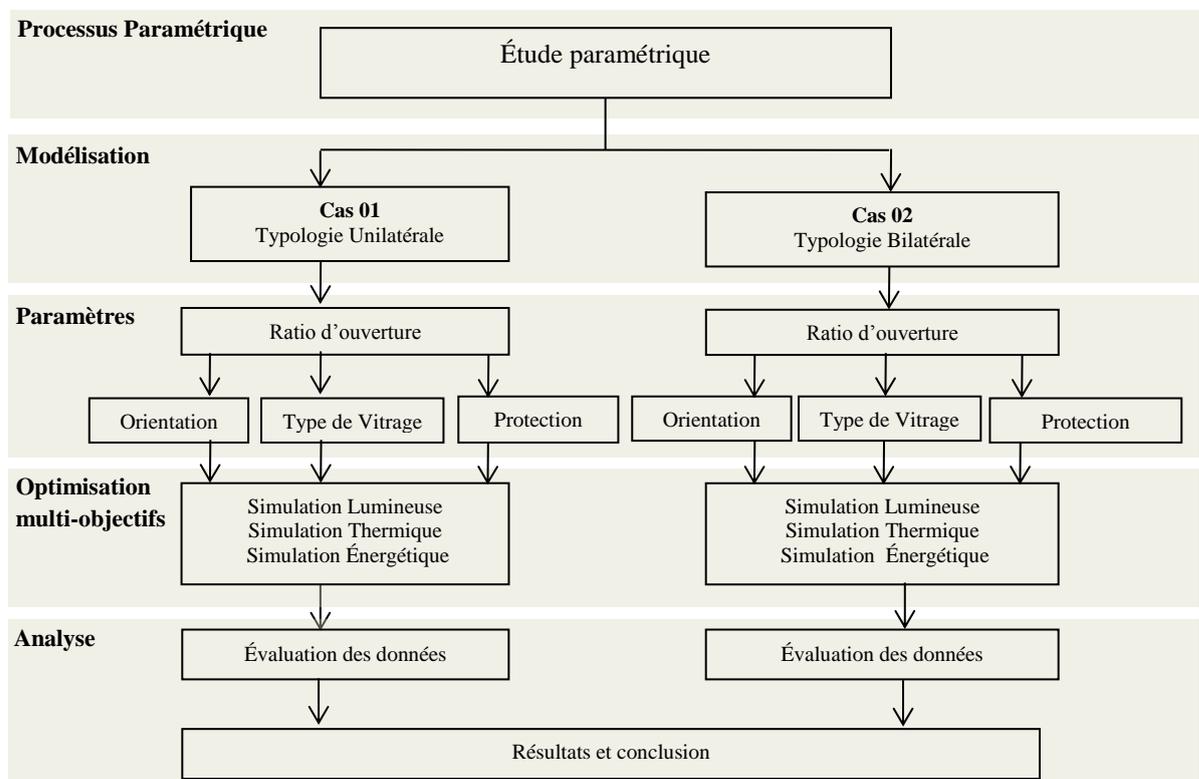


Figure VI. 5 : Schéma explicatif de la méthodologie de l'évaluation paramétrique. Source : (Auteur, 2020).

L'application d'un algorithme génétique, permettra de trouver la solution optimale qui représente le meilleur compromis pouvant être fait entre la performance lumineuse, thermique, et énergétique (figure VI.6).

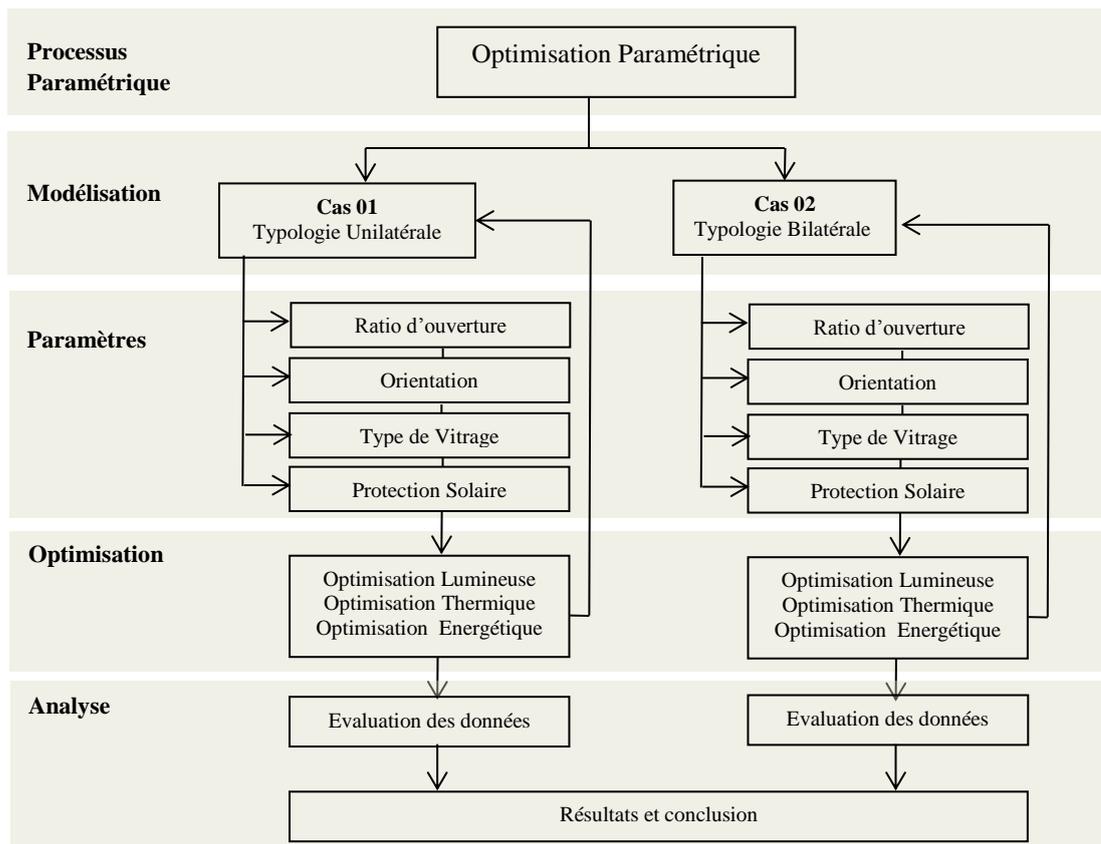


Figure VI. 6 : Schéma explicatif de la méthodologie de l'optimisation paramétrique. Source : (Auteur, 2020).

VI.3.1 Description des modèles numériques

Sur la base des résultats de l'analyse typologique, deux configurations de bâtiments scolaires les plus courantes à Biskra ont été sélectionnées pour réaliser l'étude paramétrique et l'optimisation ; il s'agit du plan à coursive (bilatérale) et du plan à corridor central (unilatérale). Pour les deux cas, le bloc pédagogique est composé de douze (12) salles de classe à hauteur de rez-de-chaussée plus un étage (R+1), ce qui représente 70% des bâtiments étudiés. La figure (VI.7) représente les deux modèles dessinés par le logiciel Grasshopper/Rhinocéros.

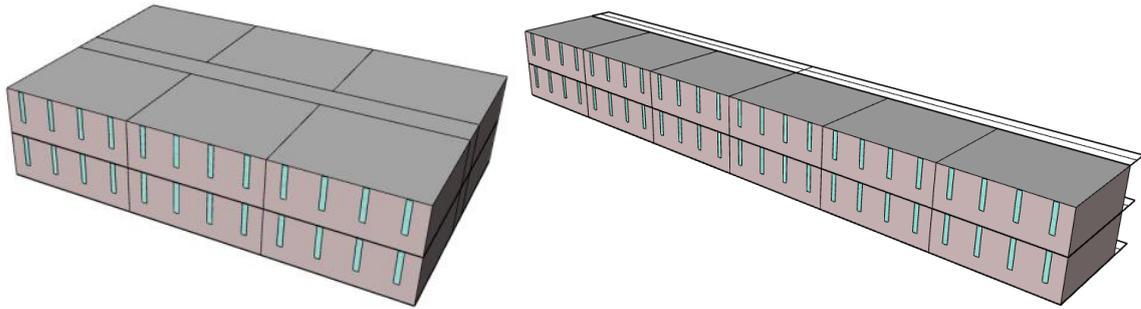


Figure VI. 7 : Modélisation des deux bâtiments pris comme cas d'étude : typologie unilatérale (gauche), et typologie bilatérale (droite) (Source : Auteur, 2019).

L'analyse typologique a mis en exergue les caractéristiques architecturales et dimensionnelles récurrentes des salles de classe. Ainsi, il est apparu que la géométrie de la salle de classe était de forme rectangulaire ou proche du carré ; les dimensions variaient de 8.40 m à 9 m pour la longueur, et de 6 m à 8.4 m pour la largeur, avec une superficie totale de 50 m² à 70 m². La hauteur de la salle de classe variait entre 2.80 m et 4.08 m. Selon les dimensions recommandées par le Ministère de l'Éducation Nationale en 1971 pour une salle de classe ordinaire, la surface modulable de la classe est estimée entre 60 m² et 62 m² avec une surface utile de 1.40 m² à 1.50 m² par élève et une capacité de 40 élèves/ classe. De plus, un éclairage unilatéral ne peut être accepté que si la classe ne dépasse pas 7.2 m de profondeur (Ministère de l'Éducation Nationale, 1982). Sur la base de ces données, les dimensions de la salle de classe qui serviront à la modélisation ont été fixées comme suit: longueur: 8.4m, largeur: 7.2m, et hauteur: 3m. La figure VI.8 illustre une salle de classe définissant l'unité modulaire de base des deux typologies.

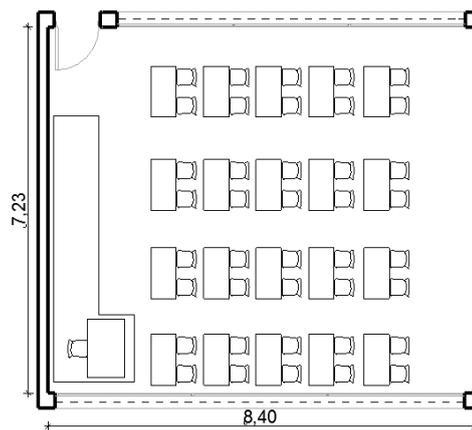


Figure VI. 8 : Modèle d'une salle de classe. Source : (Auteur, 2020).

VI.3.2 Paramètres de la simulation

Les composants de la façade et leurs propriétés formelles, dimensionnelles et matérielles déterminent sa performance en termes environnementale et énergétique. Avant de procéder à l'étude paramétrique, plusieurs paramètres ont été sélectionnés pour analyser leurs impacts sur

la performance lumineuse, thermique et énergétique de la salle de classe. Les paramètres retenus sont : le ratio des fenêtres de la façade, l'orientation, le type de vitrage, la protection solaire et le type de parois extérieures (matériau et composition).

VI.3.2.1 Ratio d'ouvertures des fenêtres de la façade

Le ratio d'ouverture des fenêtres de la façade est un facteur déterminant vis à vis de la performance du bâtiment. Pour tester l'impact de ce facteur, les dimensions des fenêtres sont changées de manière paramétrique en fonction du rapport (fenêtre / mur). Ce rapport (ratio d'ouverture) varie de 0.1 à 0.9, avec des incréments de 0.1 comme illustré dans la figure VI.9.

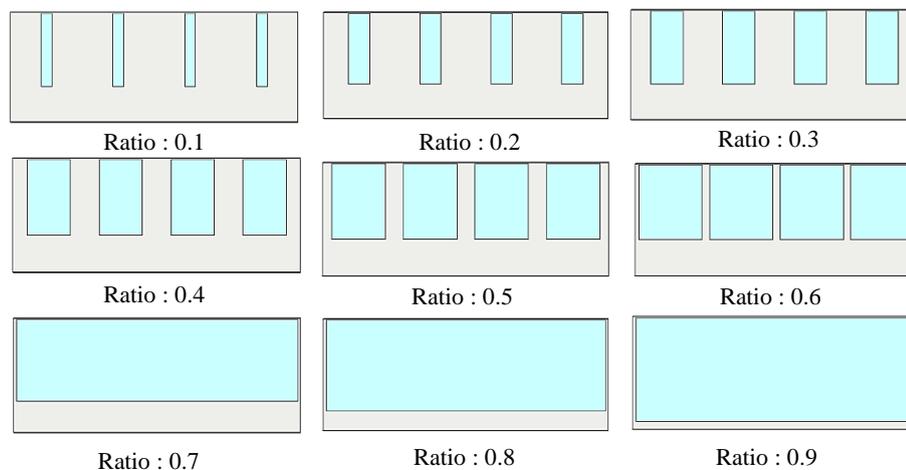


Figure VI. 9 : Différent ratio d'ouverture considérés pour la simulation (Source : Auteur, 2019).

VI.3.2.2 Orientation

L'investigation a également porté sur l'impact de l'orientation des fenêtres sur la performance des salles de classe. La direction des fenêtres a été variée selon les quatre orientations principales (Est, Ouest, Nord, Sud) pour la typologie unilatérale, et selon les deux orientations (Nord/ Sud, Est/Ouest) pour la typologie bilatérale (salles de classe ouvertes sur deux côtés).

VI.3.2.3 Type de Vitrage

Le verre par ses propriétés physiques influence la performance thermique et lumineuse des espaces intérieurs. Cinq types de vitrage ont été choisis (Tableau VI.6). Lors de la simulation, ces types de verre ont été combinés avec différents ratios d'ouverture pour voir les effets de la modification de ces deux paramètres conjointement sur la performance lumineuse, thermique, et énergétique de la salle de classe.

Tableau VI. 4 : Différents types de vitrage considérés. Source : (Auteur, 2019).

Type de Vitrage	U Conductivité thermique W/m-K	SHGC Coefficient de grain de chaleur solaire	VT Transmittance Visible
Simple clair	1.04	0.86	0.9
Simple coloré	1.04	0.73	0.68
Double clair	0.48	0.76	0.81
Double coloré	0.49	0.63	0.61
Double vitrage avec un faible apport solaire (Low_E)	0.24	0.26	0.64
Triple vitrage avec un faible apport solaire (Low_E)	0.15	0.24	0.51

VI.3.2.4 Protection solaire

La protection solaire a un impact significatif sur la réduction des gains de chaleur échangés entre le bâtiment et son environnement à travers les ouvertures; sa fonction première est d'empêcher les rayons solaires défavorables. Cependant, elle a également un impact direct sur le pourcentage de surface de la fenêtre et la quantité d'éclairage intérieur.

Pour cette raison, il est nécessaire d'aborder ce paramètre clé, surtout, dans une étude consacrée à la performance des ouvertures. Ainsi, pour les besoins de la simulation, une protection solaire fixe maçonnée a été choisie. On considère qu'elle est construite avec un mortier de ciment armé. La description des caractéristiques thermiques et lumineuses de la cette protection solaire dans le programme de simulation sont considérées les suivantes: épaisseur 0.020 m et conductivité thermique 1.15 W/m-K, densité 1900 kg/m³, chaleur spécifique 230 J/kg-k, facteur de transmission visible 0.65.

Le calcul de la protection solaire a été corrélé au mouvement du soleil dans le ciel pour la localisation de la région de Biskra à l'aide du composant "Ladybug_SunPath" du logiciel Grasshopper, qui est capable de déterminer la trajectoire du soleil à des moments précis. Deux jours ont été choisis représentant le solstice d'hiver (21 Décembre) et le solstice d'été (21 Juin), car le climat chaud et sec nécessite une protection en hiver et en été. Les vecteurs ont été calculés sept fois par jour pendant les heures de l'occupation des salles de classe soit de 09h à 15h avec un intervalle d'une heure. La figure VI.10 illustre la protection solaire générée pour chaque orientation ; il s'agit d'une protection horizontale dans l'orientation sud, la protection mixte entre horizontale et verticale à l'Est et l'Ouest, et le Nord sans protection solaire.

Le calcul à l'aide de la trajectoire du soleil

Protection solaire pour l'orientation Sud

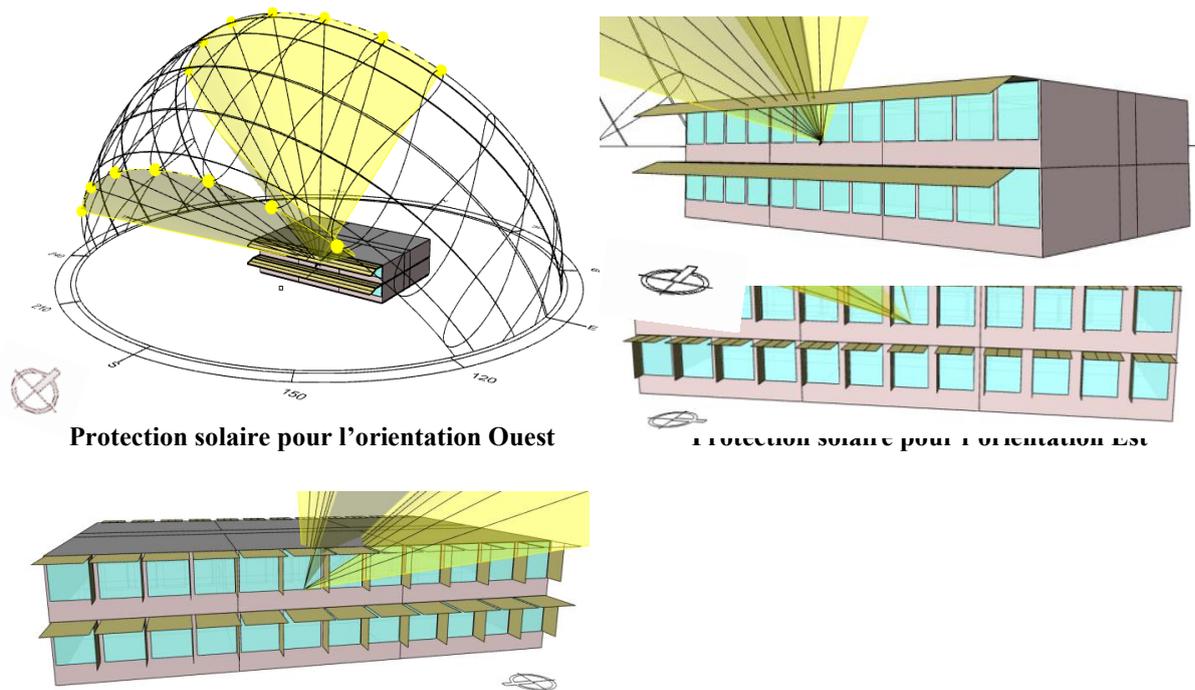


Figure VI. 10 : Calcul de la protection solaire optimale pour des salles de classes situées dans la région de Biskra. Source : (Auteur, 2020).

VI.3.2.5 Composants de parois extérieures

La composition des murs extérieurs et les caractéristiques thermo-physiques de leurs matériaux ont un rôle important dans la maîtrise des gains/pertes de chaleur du bâtiment à travers l'enveloppe. L'impact de ce paramètre sur le confort thermique et la réduction de la consommation d'énergie pour le chauffage et le rafraîchissement est remarquable. Dans la présente étude plusieurs types de murs couramment utilisés dans la construction ont été choisis. L'impact de ces différents types de murs sur le ratio d'ouverture des fenêtres de la façade en termes de performance thermique et énergétique, sera examiné. Le tableau VI.7 détaille les différentes couches des parois ainsi que les caractéristiques thermiques de chaque matériau.

Tableau VI. 5 : Types de murs considérés et propriétés des matériaux utilisés. Source: (DTR C 3-2 1997 Documentation Technique Réglementaire du Ministère du Logement, Algérie).

Type des murs extérieurs	U Conductivité thermique	Epaisseur (m)	Densité kg/m ³
--------------------------	--------------------------	---------------	---------------------------

	W/m-K		
Mur Brique creuse en ciment (20cm)			
Enduit de ciment extérieur	1.15	0.015	1900
Bloc de ciment en béton	0.65	0.02	1185
Enduit en plâtre intérieur	0.57	0.015	1150
Mur monomur perforée de (35 cm)			
Enduit de ciment extérieur	1.15	0.015	1900
Brique monomur perforée			470
Enduit en plâtre intérieur	0.57	0.015	1150
Mur double brique rouge avec une lame d'air			
Enduit de ciment extérieur	1,15	0.015	1900
Brique rouge perforée	0.45	0.15	650
Lame d'air	0.28	0.005	1
Brique rouge perforée	0.45	0.10	650
Enduit en plâtre intérieur	0.57	0.015	1150
Mur double brique rouge avec isolation (laine de mouton)			
Enduit de ciment extérieur	1.15	0.015	1900
Brique rouge perforée	0.45	0.15	650
Laine de mouton	0.06	0.005	35
Brique rouge perforée	0.45	0.10	650
Enduit en plâtre intérieur	0.57	0.015	1150

VI.3.3 Indicateurs de la simulation

Pour l'évaluation de la performance de l'espace dans les salles de classe, en termes de lumière naturelle, de confort thermique et de consommation énergétique, une recherche dans la littérature a été faite, nous avons sélectionné les indicateurs suivants:

- Eclairage utile de la lumière du jour UDI (Useful daylight illuminance) pour évaluer la lumière naturelle.
- La consommation énergétique annuelle EUI (Energy Use Intensity).
- la température opérative mensuelle T_o ainsi que le pourcentage de confort adaptatif l'ACP (Adaptive Comfort Percentage) pour évaluer le confort thermique.

VI.3.4 Programme, Occupation et charges

La simulation est réalisée sous les conditions météorologiques spécifiques de la ville de Biskra qui se caractérise par un climat chaud et sec. Sous Rhino-Grasshopper, le plug-in Ladybug importe le fichier de données climatiques de la ville de Biskra au format (* epw) selon les données météorologiques de la période (2003-2017) pour les utiliser avec le logiciel EnergyPlus. La simulation dans Ladybug et Honeybee se déroule en plusieurs étapes dans

lesquelles des paramètres constants relatif au bâtiment et aux conditions de son exploitation ont été spécifiés, ainsi : le nombre de personnes par surface de plancher est fixé à 0.49 ppl/m², les points de consigne de refroidissement et de chauffage qui contrôlent le fonctionnement du système HVAC sont réglés respectivement à 26 °C (été) et 20 °C (hiver). Le système HVAC est configuré pour être: mono-zone emballé-AC. La température intérieure minimale et maximale au-delà de laquelle la ventilation naturelle sera actionnée est respectivement fixée à 22 °C et 28 °C. Enfin, la température extérieure maximale est fixée à 28 °C. Ces valeurs sont référencées à partir de la norme EN 1525.

VI.4 Résultats de l'étude paramétrique

Pour commencer, une comparaison entre la typologie unilatérale et bilatérale a été réalisée afin de comprendre la différence entre les deux typologies en termes d'éclairage naturel et de consommation énergétique.

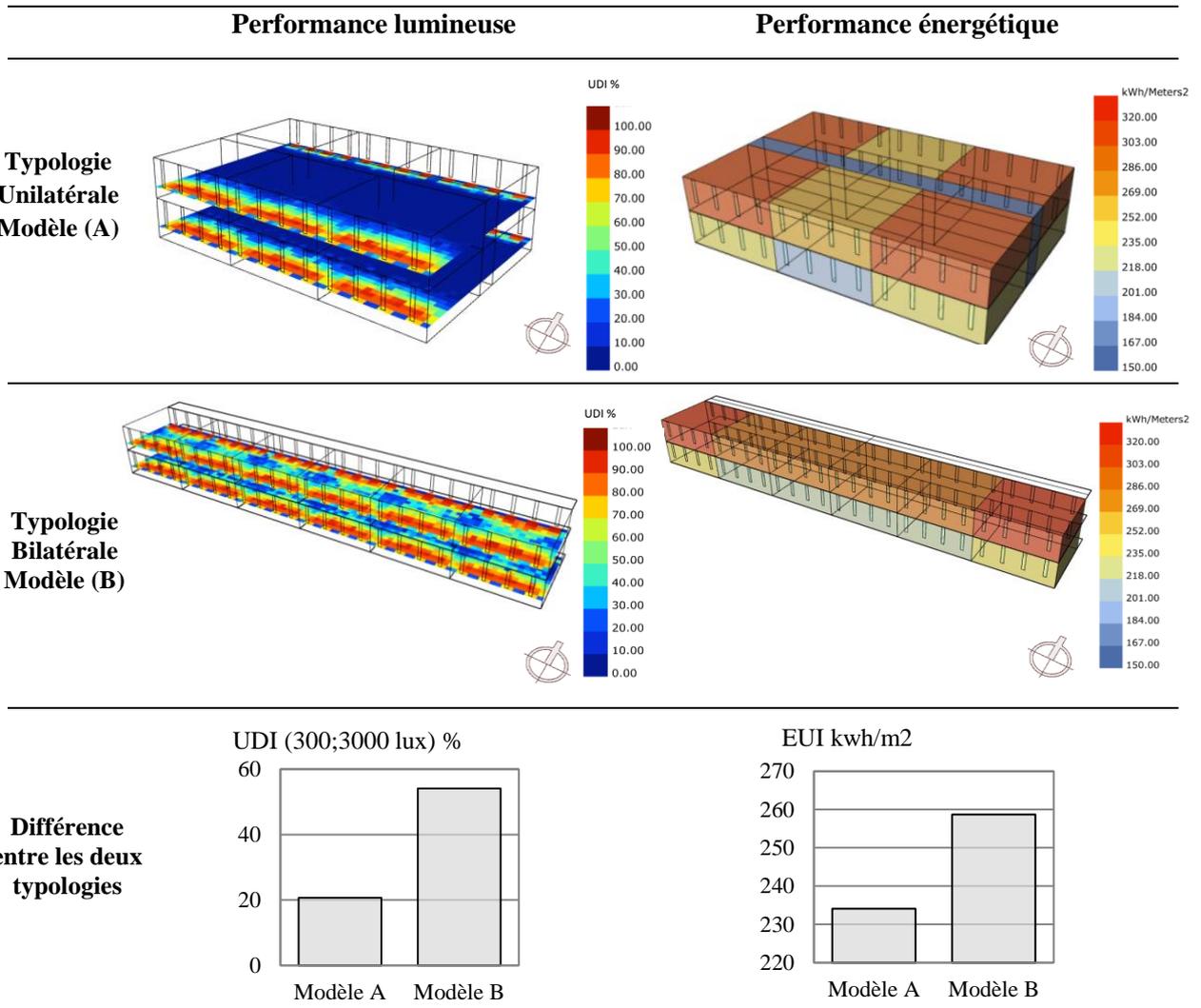
VI.4.1 Comparaison entre la typologie unilatérale et bilatérale

Le tableau VI.8 représente une comparaison entre les deux typologies unilatérale (A) et bilatérale (B) en termes de pourcentage annuel d'éclairage utile (UDI %) qui varie entre 300 lux et 3000 lux, et sa répartition au niveau du plan de travail à hauteur de 0.75 m à l'intérieur des salles de classe dans les deux typologies. On peut remarquer que le niveau d'éclairage dans la typologie bilatérale est meilleur que celui réalisé dans la typologie unilatérale ; UDI atteint plus de 50% dans la première typologie, en revanche, il n'atteint que 20% dans la seconde typologie. Il est également clair que le niveau d'éclairage est plus intense au premier étage qu'au rez-de-chaussée pour les deux types.

Une comparaison des consommations énergétiques pour le chauffage, la climatisation et l'éclairage électrique entre les deux blocs éducatifs, a également, été effectuée. Les résultats ont indiqué que la typologie unilatérale (A) consomme 234.11 kWh/m²/an, tandis que la typologie bilatérale (B) utilise 258.7 kWh/m²/an. Il est clair que le type (B) consomme plus d'énergie que le type (A), avec une différence de 24.59 kWh/m²/an. La répartition de l'énergie annuelle consommée dans les salles de classe a également été analysée en fonction de leur localisation ; les salles de classe situées à l'étage consomment plus d'énergie que celles situées au rez-de-chaussée. Les valeurs annuelles de consommation énergétique sont comprises entre 167 et 235 kWh/m² au rez-de-chaussée et entre 252 et 320 kWh/m² au premier étage. Cette différence résulte d'une augmentation de la surface exposée à l'extérieur et donc d'une augmentation des gains (ou pertes) thermiques qui se produisent. En effet, le toit du premier étage est plus exposé

au soleil et reçoit donc plus de chaleur. Le même phénomène peut être observé dans les salles de classe des extrémités Est et Ouest du bâtiment. Ces pièces consomment plus d'énergie que celles à l'intérieur en raison de la différence de surface des murs exposés à l'extérieur.

Tableau VI. 6 : Comparaison entre les deux modèles unilatéral (A), et bilatéral (B) exprimée en termes de performances lumineuses (UDI) et énergétiques (EUI). Source : (Auteur, 2020).



VI.4.2 Optimisation multi-objectifs du ratio d'ouverture des fenêtres

Après avoir effectué l'étude paramétrique multicritères pour évaluer l'impact combiné du ratio d'ouverture des fenêtres de la salle de classe avec chacun des quatre paramètres clés susceptibles de l'affecter à savoir : orientation, type de vitrage, protection solaire, et composante des parois, cette dernière section du chapitre est consacrée à la présentation de la méthode d'optimisation multi-objectifs qui a été appliquée pour déterminer le ratio d'ouverture optimal permettant d'établir le juste équilibre entre les trois indicateurs de performance étudiés : niveau d'éclairage, conditions de confort thermique, et consommation énergétique annuelle.

Rappelons que l'optimisation est la procédure consistant à trouver la valeur minimale ou maximale d'une fonction en choisissant des variables sélectionnées soumises à un certain nombre de contraintes. Les algorithmes évolutifs 'multi-objectifs' de même que les algorithmes génétiques peuvent être utilisés pour résoudre des problèmes de conception complexes qui nécessitent de nombreuses itérations afin de découvrir des solutions de conception optimales répondant à certains critères fixés par l'utilisateur. Dans cette approche automatisée d'optimisation, le système paramétrique devient le génome, le champ des alternatives devient la population, et l'objectif de conception architecturale devient le critère de fitness (Konis et al., 2016).

Les algorithmes d'optimisation multi-objectifs peuvent gérer un nombre important et arbitraire d'objectifs au prix d'une réduction de la vitesse de calcul. Dans ce cas, le « front de Pareto » (*Pareto front* en anglais) est souvent utilisé pour illustrer les résultats de l'optimisation ; il s'agit d'une courbe qui relie toutes les solutions optimales pour les objectifs et contraintes définis. Le « Pareto front fait référence à une surface de solution dans un espace de solution multidimensionnel formé par de multiples critères représentant les objectifs ». Pour les solutions multi-variées, un espace visuel de solutions est fourni qui s'étend idéalement d'un compromis extrême à un autre. De nombreux projets de recherche ont adopté l'utilisation d'algorithmes évolutionnaires multi-objectifs.

L'optimisation paramétrique multi-objectifs a été réalisée grâce au plug-in Octopus sous Grasshopper. L'objectif principal de cette étape est d'obtenir une utilisation optimale de la lumière du jour, sans réduire le niveau de confort thermique, tout en rationalisant la consommation d'énergie considérant des bâtiments scolaires situés dans une région chaude et aride. Pour atteindre les trois « objectifs » soulignés, trois indicateurs (métriques) ont été sélectionnés à partir de la littérature existante. Tel que mentionné dans les chapitres précédents, le UDI compris entre (300 lux et 3000 lux) servira à évaluer la performance de la lumière du jour à l'intérieur des salles de classe ; l'intensité énergétique utilisée (EUI) permettra d'évaluer la performance énergétique ; et enfin, le confort thermique adaptatif (ACP) sera la métrique utilisée pour évaluer le confort thermique.

Après avoir sélectionné les 'objectifs' (variables) à optimiser, les paramètres qui seront modifiés d'un cas à un autre, ont également été définis. Ainsi, le ratio d'ouverture est un paramètre fixe principal qui varie de 0.1 à 0.9 avec un intervalle de 10% (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9). Les autres variables sont : six orientations unilatérales et bilatérales (Nord,

Sud, Est, Ouest, Nord/Sud, Est/Oust), la présence d'une protection solaire et le type de verre. Les vitrages choisis sont ceux utilisés précédemment: simple claire, simple coloré, double claire, double coloré, vitrage double à faible gain solaire (Low-E), et vitrage triple à faible gain solaire (Low-E).

La figure VI.25 représente la démarche utilisée pour obtenir le ratio optimal à l'aide de la méthode d'optimisation paramétrique via un logiciel génétique (GA). L'éclairage de jour utile UDI est compris entre (300-3000) lux, le confort adaptatif ACP est exprimé en pourcentage, et il est compris entre (0-100)%, tandis que l'intensité de consommation d'énergie EUI représente la consommation annuelle d'énergie pour le refroidissement, le chauffage et éclairage artificiel exprimé en KWh/m².

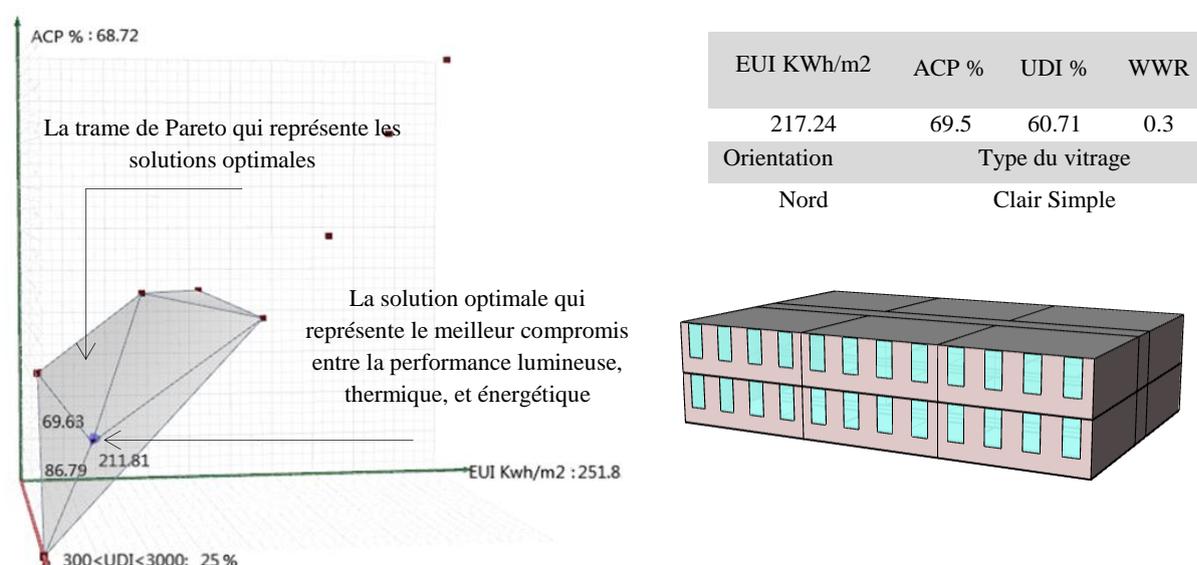


Figure VI. 11 : La recherche de la solution optimale à l'aide de 'Octopus' plug-in. Source : (Auteur, 2020).

Les points représentés en rouge sont l'ensemble des solutions, la trame triangulaire définie le 'Pareto front' qui représente les solutions acceptables parmi l'ensemble de la population. Le point sélectionné en bleu représente la solution optimale, le meilleur compromis entre l'éclairage de jour utile UDI, le confort thermique adaptatif ACP et l'intensité d'énergie utile EUI. La solution représentée en bleu dans la figure montre que le ratio 0.3 est optimal en cas d'une salle de classe unilatérale orientée vers le Nord avec simple vitrage sans protection solaire, EUI, ACP et UDI obtenus sont respectivement 217.24KWh/m², 69.5%, et 60.71%.

De la même manière, d'autres propositions ont été simulées, les résultats sont présentés dans le Tableau VI.9. Ainsi, nous pouvons remarquer que le ratio d'ouverture varie selon la

configuration (unilatérale-bilatérale), le type de vitrage, la présence de protection solaire. L'ajout de vitrages spéciaux (coloré, double ou triple) augmente la performance thermique et énergétique, cependant, la performance lumineuse est minimisée. D'autre part, l'ajout d'une protection solaire adéquate réduit la consommation d'énergie et augmente la performance lumineuse et thermique.

Tableau VI. 9 : Le ratio d'ouverture optimal pour différentes configurations des salles de classe. Source : (Auteur, 2020).

Orientations	Variables							
	Fenêtres à vitrage clair simple sans protection solaire	Fenêtres à vitrage clair simple avec une protection solaire	Fenêtres à vitrages spéciaux					
			Simple coloré	Double Clair	Double Coloré	Double Low-E	Triple Low-E	
Typologie Unilatérale								
Nord	Ratio	0.3	/	0.4	0.4	0.5	0.6	0.6
	EUI	217.24	/	219.98	223.63	220.93	206.64	205.03
	ACP	69.5	/	76.44	75.45	75.7	76.14	76.66
	UDI	60.71	/	62.32	74.73	72.17	83.86	83.86
Sud	Ratio	0.2	0.4	0.3	0.2	0.3	0.5	0.5
	EUI	236.92	217.09	228.34	230.84	228.42	213.29	211.69
	ACP	73.04	78.33	74.74	74.38	74.14	78.93	79.21
	UDI	62.84	74.62	58.34	61.83	63.22	61.46	61.46
Est	Ratio	0.3	0.5	0.4	0.4	0.4	0.6	0.7
	EUI	257.4	238.2	252.9	249.31	247.48	227.12	219.98
	ACP	76.22	74.74	76.58	76.96	76.79	75.21	79.73
	UDI	63.38	72.96	70.26	63.38	61.68	68.63	62.26
Ouest	Ratio	0.3	0.5	0.3	0.3	0.4	0.6	0.6
	EUI	262.27	235.14	257.37	253.91	251.85	223.24	224.07
	ACP	67.63	73.86	71.75	72.27	72.16	78.9	75.89
	UDI	63.8	64.08	64.96	63.83	63.22	65.95	68.63

Le Tableau (VI. 9) permet de faire d'autres lectures. Ainsi, il est à noter que pour la **typologie unilatérale**, l'ajout d'une protection solaire à une fenêtre qui n'en a pas nécessite environ le double de la surface d'ouverture pour arriver à la même solution optimale. En outre, l'orientation **Nord** assure une performance optimale avec un ratio de **0.3**, elle ne demande pas de protection solaire, mais l'ajoute d'un vitrage spécial est requis pour augmenter la performance lumineuse. Les types de vitrage le plus optimal qui enregistre un UDI (éclairage) maximum et un EUI (énergie) minimum sont le vitrage double et triple Low-E, car ils sont presque similaires. Le ratio optimal dans ce cas est **0.6**.

L'orientation **Sud** nécessite de petits ratios d'ouverture par rapport aux autres orientations, car l'intensité d'éclairage est plus élevée dans cette direction. Le ratio optimum est **0.4** avec la protection solaire ou bien le ratio **0.2** sans protection. L'ajout de vitrages spéciaux augmente la performance énergétique, cependant, il minimise la performance lumineuse. La solution optimale pour cette orientation est le cas du simple vitrage avec protection solaire.

Les deux orientations Est et Ouest sont les plus difficiles à contrôler. Cependant, l'orientation **Ouest** est plus énergivore que l'orientation **Est**. L'ajout de protection solaire minimise l'EUI (énergie) et augmente l'UDI (éclairage). Le ratio optimal en cas de vitrage simple sans protection solaire est **0.3** et avec la protection solaire est **0.5** dans les deux orientations Est et Ouest. En cas d'un vitrage spécial, le double vitrage à Low-E est la solution la plus performant avec un ratio de **0.6**.

Conclusion

Ce chapitre a présenté les étapes de l'analyse paramétrique multicritères et l'optimisation effectuée sur la base d'une simulation numérique via le logiciel Rhino/Grasshopper. L'étude s'est intéressée à l'impact des éléments architecturaux de la façade sur la performance du ratio d'ouverture dans les salles de classe en considérant deux typologies différentes (unilatérale et bilatérale). Le travail de simulation a commencé par une opération de validation/calibration lumineuse et thermique du modèle numérique à travers une comparaison entre des mesures calculées avec le logiciel de Grasshopper (valeurs simulées) et les mesures réelles effectuées in situ (valeurs mesurées). Les résultats de la validation du modèle conçu pour l'évaluation de l'éclairage à l'intérieur des salles de classe, ont indiqué un pourcentage d'erreur de RMSE% égale à 29.79% en hiver et 16.10 % en été, ce qui est considéré comme acceptable par référence aux études précédentes. En revanche, la différence entre les résultats des mesures et de la simulation de la température est de l'ordre de 0.05°C à 2.26°C (hiver et été) avec un pourcentage de 0.14 % à 6.58%, ce qui ne dépasse pas 10% et donc est considéré comme une marge d'erreur tolérable.

Une fois le modèle validé, une comparaison a été faite entre les deux typologies (unilatérale et bilatérale) en termes de performance lumineuse et énergétique. Les résultats obtenus ont révélé que le niveau d'éclairage dans la typologie bilatérale est meilleur que celui de la typologie unilatérale (UDI est supérieur au double), en outre, le niveau d'éclairage au premier étage est plus intense que dans le rez-de-chaussée et ce pour les deux typologies. Énergétiquement le phénomène est inversé, la typologie bilatérale consomme plus d'énergie que la typologie unilatérale, avec une différence de 24.59 kWh/m²/an.

La deuxième partie de l'analyse a été consacrée à l'évaluation de l'impact du changement du ratio d'ouverture sur les performances des salles de classe pour les deux typologies unilatérales et bilatérales. Différents paramètres et attributs de façade dont les caractéristiques peuvent affecter la performance du ratio d'ouverture, ont également été examinés. Il est apparu que le

ratio optimal est différent d'une typologie à une autre, ainsi que selon l'orientation, le type de vitrage et la présence ou l'absence de protection solaire. Dans la typologie unilatérale, l'éclairage naturel était optimal avec les grands ratios d'ouverture, le pourcentage de l'éclairage utile inclus dans l'intervalle (300-3000 lux) était maximum au ratio 0.4 dans l'orientation Sud, et maximum au ratio 0.5 dans l'orientation Est et Ouest est Nord. Par contre la typologie bilatérale a enregistré des valeurs optimales avec un ratio de 0.1 pour les deux orientations Est/Ouest et Nord/Sud.

En revanche, les conditions thermiques les plus favorables ont été obtenues avec les petits ratios d'ouverture pour les deux typologies et dans toutes les orientations. D'autre part, la consommation énergétique était minime avec le ratio 0.2 et le ratio 0.1 dans la typologie unilatérale et bilatérale respectivement. L'ajout de vitrages spéciaux ou bien de protection solaire avec un taux d'ombrage de 100% a inversé le phénomène, les ratios d'ouverture maximum deviennent les plus performants en termes d'éclairage naturel, de confort thermique et de consommation énergétique.

Cette diversité dans les résultats a conduit à rechercher une méthode qui aide à trouver le meilleur compromis (équilibre) entre performances : lumineuse, thermique et énergétique. L'outil d'optimisation multi-objectifs, basé sur des algorithmes génétiques 'Octopus' a été utilisé pour réaliser une optimisation paramétrique. Les trois objectifs de l'optimisation sont : EUI Minimum, ACP Maximum et UDI Maximum, les paramètres sélectionnés sont la typologie, l'orientation, le type de vitrage, et la protection solaire. Les simulations effectuées ont fourni le ratio d'ouverture optimal qui changeait d'un cas à l'autre selon les scénarios d'optimisation envisagés.

Conclusion Générale

Principaux aboutissements de la recherche

Cette recherche a été menée dans le but d'étudier l'impact du ratio d'ouverture de la façade sur la performance lumineuse, thermique, et énergétique dans les établissements scolaires et plus particulièrement dans les salles de classe relativement aux conditions climatiques chaudes et arides du sud de l'Algérie. Le présent manuscrit est divisé en deux parties ; la première a été consacrée à l'élaboration du cadre théorique et conceptuel dans lequel ont été définis les concepts-clés liés aux hypothèses ainsi que les notions de base qui ont servi de socle à l'investigation. La deuxième partie analytique a été dédiée à la vérification empirique et expérimentale des liens entre les variables selon un cadre méthodologique préalablement élaboré. La méthodologie s'appuie sur trois approches fondamentales : conceptuelle, empirique et numérique. L'approche conceptuelle a permis de créer une base de connaissances théoriques destinée à clarifier les notions et les concepts qui supportent la recherche. Elle est divisée en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, la littérature a permis d'examiner des notions fondamentales concernant les établissements scolaires et leur évolution. Au fil du temps, l'école est passée par plusieurs phases qui ont influencé son fonctionnement et le mode d'occupation de ses espaces. Le développement historique de l'architecture scolaire a créé un langage architectural spécifiquement destiné à l'enseignement et aux activités d'apprentissage. Au départ, l'école était une pratique qui manquait de lieux dédiés à cet effet. Les connaissances se transmettaient à travers de nombreuses activités de la vie pratique. Aujourd'hui, avec l'évolution humaine et le progrès technologique, les activités pédagogiques exigent une variété d'espaces modifiables et adaptables, et l'espace éducatif requiert une grande flexibilité spatiale et des exigences bien précises du point de vue de la qualité architecturale.

En outre, une lecture focalisée sur l'organisation spatiales des établissements scolaires dans le monde et en Algérie a permis de faire ressortir les différents typologies du bâtiment scolaire. Ainsi, quatre catégories ont été mises en exergue : type cour, type bloc, type grappe, et type ville. Toutes les typologies sont générées à partir d'une unité répétitive représentée par la salle de classe, par contre, elles diffèrent dans les articulations et les modes de distribution de ces unités.

Pour clore ce premier chapitre, la relation entre les bâtiments éducatifs et l'efficacité énergétique a été examinée. À ce titre, il faut savoir que l'énergie fossile est principalement utilisée dans les bâtiments scolaires pour répondre à un ensemble d'exigences de différentes

natures et degrés tels que le chauffage, le refroidissement et l'éclairage. Par conséquent, le fonctionnement des établissements scolaires représente une part importante de la consommation totale d'énergie du secteur du bâtiment. De fait, leur conception constitue une opportunité importante vers l'efficacité énergétique.

Le climat a un impact significatif sur l'être humain dans son environnement naturel et construit, ainsi que sur la façon dont il conçoit ses lieux de vie. Le deuxième chapitre a abordé la relation entre le comportement humain et l'environnement thermique intérieur. Le climat est un facteur important résultant de l'interaction de plusieurs éléments climatiques (température, humidité, mouvement atmosphérique, rayonnement solaire, précipitations, etc.) qui fournit une description statistique de l'état du système terrestre. L'influence de ses éléments varie d'une région à une autre, la création de méthodes de classification de climat a permis de mieux comprendre ses caractéristiques et d'adapter la conception du bâtiment en fonction des spécificités climatiques.

L'Algérie est un pays où le désert couvre plus des quatre cinquièmes du territoire avec un climat chaud et sec dominant. Ce climat se caractérise par un ciel clair et ensoleillé la majorité de l'année, entraînant une humidité relative très faible, et des températures élevées causées par un rayonnement solaire intense, de faibles précipitations et des vents sablonneux. Considérant ses caractéristiques, l'objectif principal d'une conception soucieuse d'assurer des conditions de confort favorables sera de réduire les extrêmes de chaleur et de sécheresse, et en particulier, de se protéger contre le rayonnement solaire élevé. À ce titre, les stratégies passives d'adaptabilité climatique de la conception dans un environnement chaud et aride sont la compacité et l'ombre (les tissus urbains denses, les rues étroites ombragées, les bâtiments à patio, les murs massifs, les petites ouvertures, les couleurs claires... etc.).

La deuxième section de ce chapitre a été consacrée au confort thermique, et plus particulièrement à ses exigences dans les établissements scolaires. Dans l'environnement bâti, le confort thermique est la condition sine qua non à laquelle les concepteurs doivent apporter les réponses adéquates. L'état de confort physiologique varie selon des individus, leur âge, leur sexe, leur état de santé, les vêtements portés et la nature de l'activité physique ; la situation géographique joue également un rôle en raison du comportement humain et de l'adaptabilité. Le domaine de la recherche sur le confort thermique est partagé entre deux méthodes décrivant la perception thermique humaine de l'environnement thermique. La première est la méthode statistique qui vise à étudier le confort thermique de manière analytique basée principalement

sur le calcul du bilan thermique du corps humain à l'aide de modèles physiques et physiologiques. La deuxième méthode est l'approche adaptative, qui repose sur des mesures empiriques et les résultats d'enquêtes menées dans des bâtiments in situ.

Il existe plusieurs normes et standards consacrés à l'évaluation du confort thermique, telles que ISO 7730, CEN 15251 et ASHRAE Standard 55, qui sont classés en diverses catégories en fonction du type d'ambiance (modéré, chaud ou froid) et le type d'application (évaluation globale ou bien support de calcul). A l'échelle européenne, il existe au total 18 normes dédiées uniquement au confort thermique. Cependant, la revue de la littérature a révélé l'absence d'une norme traitant spécifiquement de l'environnement thermique interne des bâtiments scolaires et des salles de classe pour les élèves d'âges différents à différents stades de leur formation, obligeant les concepteurs et les architectes à s'appuyer sur les normes existantes. La température estivale maximale recommandée dans la norme NF EN 152515 se situe entre 26 et 27 °C, par contre, La norme ISO 7730 recommande une plage de température de 23 à 26 °C pendant l'été avec des vêtements plus légers.

Dans la littérature existante, le confort thermique dans les salles de classe a été largement étudié en utilisant des approches variées et en se concentrant sur différentes zones climatiques et niveaux d'enseignement. Les résultats ont confirmé que les conditions thermiques peuvent affecter la santé des élèves, provoquer de l'apathie, voire du stress, et avoir un impact sur les performances scolaires. Cependant, il s'avère que les études de confort thermique dans les salles de classe sous climats chauds et secs sont relativement peu nombreuses en comparaison avec celles effectuées sous les climats tempérés. La littérature a montré, en effet, qu'ils représentaient moins de 10 % du total des études.

Le troisième chapitre a introduit les concepts fondamentaux liés à l'éclairage naturel, ainsi qu'aux méthodes de mesure et d'évaluation du confort visuel. L'intérêt a porté sur le confort visuel dans les salles de classe, définissant les normes et les standards du confort lumineux. Tout au long de l'histoire de l'architecture, la lumière du jour joue un rôle important dans l'éclairage des bâtiments. La lumière du jour est essentielle, non seulement pour la vision, mais aussi pour ses effets et bienfaits sur les personnes travaillant, vivant ou expérimentant l'environnement bâti. La qualité et la quantité de la lumière naturelle ont un effet physiologique considérable sur le système visuel et le rythme circadien de l'être humain.

Les stratégies conceptuelles relatives à la lumière naturelle ont pour but de répondre aux besoins

des occupants en termes de confort visuel mais également d'aider à réduire la consommation d'énergie. Elles visent simultanément à capter la lumière naturelle et à se protéger contre les rayons solaires indésirable, puis à transmettre et mieux distribuer la lumière naturelle à l'intérieur du bâtiment. Enfin, il sera également nécessaire de contrôler la quantité de lumière afin d'éviter toute source de gêne visuelle sous forme de tâches sombres ou d'éblouissement.

La Commission Internationale de l'Éclairage (C.I.E.) travaille depuis 1987 sur la normalisation et l'unification internationale dans le domaine de l'éclairage. À ce titre, la norme NF EN 12665 fixe les termes de base et les exigences en éclairage, la norme NF EN 12464-1 spécifie les exigences de quantité et de qualité d'éclairage des lieux de travail, la norme NF EN 15193 précise la méthodologie de calcul pour évaluer la quantité d'énergie utilisée pour l'éclairage intérieur d'un bâtiment, et enfin, la norme NF EN 12193 fournit des valeurs pour la conception et le contrôle de l'éclairage des installations sportives.

Les normes régissant l'éclairage des établissements scolaires varient d'un pays à l'autre ; ce qui a conduit à des exigences d'éclairage différentes. La majorité des établissements d'enseignement utilisent le niveau d'éclairement au niveau du plan de travail comme critère. En outre, la variété des espaces d'apprentissage disponibles selon le niveau d'enseignement (primaire, secondaire, universitaire, etc.), impose des besoins d'éclairement différents, dans le sens où les performances visuelles d'un enfant diffèrent de celles d'un adulte. En Algérie, aucune information n'est fournie sur les exigences d'éclairage dans les établissements scolaires telles que la luminosité, l'uniformité, etc. À cet égard, la réglementation algérienne est très pauvre par rapport aux réglementations, normes et standards étrangers.

Dans ce domaine, les chercheurs ont conçu un ensemble d'indicateurs pour évaluer le confort visuel, fondant leur classification sur le caractère statique ou dynamique de l'éclairage naturel. Les paramètres statistiques portent sur des indicateurs calculés dans des conditions particulières, et leur évaluation est indépendante du temps (Eclairement, Uniformité, Facteur de lumière du jour, Eblouissement...etc.). Alors que, les indicateurs dynamiques basés sur le climat sont liés à des mesures qui reflètent la variation temporelle des conditions d'éclairage naturel (Autonomie de la lumière du jour, Éclairement utile à la lumière du jour, Autonomie de Lumière du Jour...etc.).

Le confort visuel dans les salles de classe est atteint lorsque les objets environnants peuvent être vus clairement sans causer de fatigue visuelle. Le contenu du tableau blanc, et du matériel

d'apprentissage utilisé en classe doivent tous être visibles avec un éclairage approprié. Généralement, les activités dans la salle de classe nécessitent un éclairage de plus de 300 lux, une uniformité égale à 19 et un rendu des couleurs égale à 80. La littérature a révélé, également, qu'un environnement lumineux adéquat dans les salles de classe a un impact positif sur les travaux scolaires et la concentration.

Le quatrième chapitre s'intéresse à la fenêtre et son rôle en tant que modulateur environnemental. La fenêtre est considérée comme un élément fonctionnel le plus important de l'enveloppe du bâtiment en raison de son impact significatif sur le comportement thermique du bâtiment et, implicitement, sur la quantité d'énergie consommée à l'intérieur. La fenêtre a évolué au cours des siècles, mais son rôle premier de laisser entrer la lumière du jour a persisté.

En général, la conception de la fenêtre détermine la quantité et la répartition de la lumière du jour dans l'espace. L'amélioration de la performance du bâtiment nécessite l'intégration d'une étude complète relative à l'effet des paramètres de la fenêtre (la forme, l'orientation, l'emplacement, le type de vitrage, la protection solaire, et le ratio des fenêtres de la façade...etc.). Ces paramètres clés ont un rôle important à jouer dans l'optimisation de l'éclairage et le confort thermique des utilisateurs ainsi que la réduction de la consommation énergétique. Dans ce contexte, la revue de la littérature a révélé que le rapport fenêtre/mur (WWR) joue un rôle crucial dans la consommation d'énergie pour le chauffage et la climatisation ainsi que l'éclairage électrique.

En climats chauds et secs, les petits ratios d'ouvertures sont recommandés pour réduire la consommation d'énergie, cependant, ils produisent un inconfort visuel, surtout dans les établissements scolaires où le besoin de l'éclairage naturel est important. Cette problématique mise en exergue puis confirmée à partir de l'analyse de la revue de la littérature de la partie conceptuelle a permis de positionner l'étude par rapport au champ des recherches existantes.

À ce titre, la deuxième partie du manuscrit a été focalisée sur le traitement de la problématique posée. Un cadre méthodologique a été élaboré, il présente le contexte et le cas de l'étude, décrit les techniques d'investigation et les outils utilisés dans la recherche. L'analyse des données, les résultats obtenus et leur discussion sont également fournis. Cette partie fait l'objet du cinquième et sixième chapitre.

Ainsi, le cinquième chapitre commence par présenter le contexte de l'étude soit la ville de Biskra et donne un aperçu sur son climat chaud et aride. L'analyse typologique menée dans

cette ville sur les différents établissements scolaires pour aboutir à la sélection des cas d'étude, est également passée en revue. L'analyse effectuée s'est basée sur des documents graphiques, des relevés sur terrain et des prises de photos. Au total, dix-huit (18) établissements de type CEM ont été visités et analysés. L'étude a révélé que la typologie du plan à coursive est représentative de 70% du total des établissements scolaires analysées, la typologie de corridor central représente 20%, et la typologie mixte se retrouve dans 10% du corpus. En outre, en considérant le pourcentage du ratio d'ouverture des fenêtres des salles de classe (WWR), trois types de bâtiments ont été distingués. Ainsi, en fonction de la surface vitrée des salles de classe, il apparaît que 30% des écoles avaient des ratios d'ouverture inférieure à 10%, 60% des écoles avaient un ratio d'ouverture compris entre 10% et 20%, et 10% des écoles avaient un ratio d'ouverture supérieur à 20%. D'après cette classification, les cas d'étude représentant chacune des trois catégories ont été sélectionnés pour réaliser l'étude empirique.

Le chapitre décrit le protocole élaboré pour la prise de mesures des températures et de l'éclairage naturel. L'évaluation quantitative de l'éclairage naturel et le fonctionnement thermique des salles de classe ont montré que le ratio d'ouverture de la façade détermine la quantité de lumière naturelle dans l'espace. Ainsi, les salles de classe dont les ratios d'ouverture sont relativement réduits, souffrent d'un éclairage faible et insuffisant. Ce qui rend l'espace intérieur fortement dépendant de l'éclairage artificiel et prive les occupants des avantages de la lumière du jour. En contre partie, la quantité d'éclairage naturelle augmente avec l'augmentation du ratio d'ouverture des fenêtres. Et bien que les ratios d'ouverture les plus grands procurent des espaces suffisamment éclairés, il se produit un risque d'éblouissement. En outre, les salles de classe sont exposées aux taches solaires, ce qui nécessite l'intégration d'un système de contrôle solaire. En termes d'uniformité de l'éclairage naturel, la typologie bilatérale est plus performante que la typologie unilatérale. L'orientation des fenêtres a également un impact significatif sur la répartition de la lumière dans les salles de classe.

L'étude du comportement thermique a montré qu'en hiver, les salles avec un grand ratio d'ouverture (plus de 20 %) sont plus froides que l'extérieur, tandis qu'en été, elles sont plus chaudes que l'extérieur. Il est remarquable de constater qu'il y a une grande perte de chaleur. Par contre, les salles avec un petit ratio d'ouverture des fenêtres (moins de 10 %) ont enregistré une faible différence de température et d'humidité relative entre l'intérieur et l'extérieur pendant la journée en hiver et en été. De plus, les salles avec un ratio d'ouverture moyen (entre 10-20 %) sont les plus froides en hiver ainsi qu'en été. L'influence de l'orientation sur les apports thermiques est également confirmée, les salles de classe orientées Nord/Sud sont plus chaudes en

hiver et les plus froides en été en comparaison avec les salles orientées Est/Ouest. En définitif, les résultats de l'étude expérimentale ont révélé que les établissements scolaires examinés ont une performance lumineuse et thermique médiocre.

Le dernier chapitre a été consacré à l'étude paramétrique et l'optimisation multicritères. Une validation lumineuse et thermique du modèle numérique a été préalablement effectuée à travers une comparaison entre les résultats de la simulation via le logiciel Rhino/Grasshopper et les mesures réels in situ. Selon, la littérature existante les résultats ont été considérés acceptables, ce qui a permis de valider le modèle. Par la suite, une comparaison a été faite entre la typologie du plan à coursive (bilatérale), et la typologie du plan à corridor central (unilatérale) en termes de performance lumineuse et énergétique. Il est apparu que dans la typologie bilatérale, le niveau de l'éclairage est deux fois meilleur que dans la typologie unilatérale. Énergétiquement, la typologie bilatérale consomme plus que la typologie unilatérale avec un écart de 24.59 kWh/m²/an.

Ensuite, le chapitre a examiné l'impact combiné du ratio d'ouverture dans la salle de classe avec chacun des quatre paramètres clés (i.e. orientation, type de vitrage, dispositif d'ombrage, composant des parois) supposés affecter la performance lumineuse, thermique et énergétique. Les résultats de l'étude paramétriques ont montré que le ratio d'ouverture idéal variait en fonction de la typologie, ainsi que de l'orientation, du type de vitrage et de la présence d'une protection solaire. Dans le cas de la typologie unilatérale, l'éclairage utile de la lumière du jour (UDI 300-3000 lux) était maximal avec le ratio d'ouverture de 0.4 orientation Sud, et maximal avec le ratio 0.5 dans l'orientation Nord, Est et Ouest. En revanche, la typologie bilatérale a enregistré des valeurs optimales avec le ratio d'ouverture 0.1 dans les deux orientations Est/Ouest et Nord/Sud. L'ajout d'un vitrage spécial ou d'une protection solaire a inversé le phénomène ; les grands ratios d'ouverture sont devenus les plus efficaces thermiquement, énergétiquement et en termes d'éclairage naturel. Les résultats de cette étude illustrent comment une surface transparente (taille de fenêtre) relativement grande peut être combinée avec des matériaux de vitrage efficaces, ou un système de protection solaire appropriés, afin d'améliorer les conditions environnementales des salles de classe dans les régions chaudes et sèches de l'Algérie en termes d'efficacité énergétique et de satisfaction des occupants.

Enfin, l'optimisation multicritère à l'aide du plug-in Octopus pour Grasshopper a permis de rechercher et de fournir le meilleur ratio qui assure un juste équilibre entre les trois facteurs de

performance environnementale étudiés : maximum d'éclairement utile de la lumière du jour (UDI 300-3000 lux), meilleur pourcentage de confort thermique adaptatif ACP (Adaptive Comfort Percentage), et minimum d'intensité d'énergie utilisé EUI, en agissant sur l'orientation, le type vitrage, la composante du parois et la protection solaire. L'étude des rapports fenêtre/mur optimisés pour différentes orientations de la salle de classe indique qu'il peut généralement être possible d'augmenter l'éclairage naturel en utilisant des rapports fenêtre/mur beaucoup plus élevés que ceux habituellement indiqués dans la littérature en tant que solutions de conception dans les climats chauds et secs.

Comme le suggèrent les solutions potentielles déterminées pour la salle de classe prise comme cas d'étude, il existe diverses autres options de combinaisons (ombrage, vitrage, etc.) qui peuvent être exploitées après une analyse détaillée de leurs performances considérant les objectifs de l'optimisation multicritères. Ces solutions potentielles doivent être évaluées en fonction de leur adéquation à un cas particulier. L'étude présentée ici montre donc comment une optimisation multi-objectifs utilisant des algorithmes génétiques (évolutionnaires) peut être mise en œuvre pour apporter des solutions potentielles aux architectes afin d'équilibrer les différents objectifs de performance environnementale des bâtiments, parfois contradictoires, et ainsi augmenter les opportunités de résolution de problèmes complexes dès les premières étapes du processus de conception.

Recommandations

Les résultats présentés, ici, mettent en exergue l'interaction entre les différents paramètres de conception de l'enveloppe du bâtiment dans les climats chauds et secs, et indiquent comment ces paramètres peuvent être manipulés quand il s'agit d'optimiser les choix de conception des fenêtres des salles de classe considérant le ratio d'ouverture des murs de la façade et la performance lumineuse, thermique et énergétique du bâtiment scolaire. Ces résultats suggèrent ainsi des orientations, ou des points de départ, pour explorer différentes combinaisons et spécifications de conception de l'enveloppe. Lorsqu'ils sont intégrés à une simulation numérique plus détaillée ou à d'autres études de performance qui font généralement partie des pratiques actuelles de mise en forme du projet architectural, ils peuvent être un outil utile pour réussir une conception climatique et améliorer les performances environnementales du bâtiment. De ce point de vue, les résultats de l'étude peuvent aider à concevoir des salles de classe dans des climats chauds et secs en tenant compte des recommandations suivantes :

- Les ratios d'ouverture entre 30 à 60 % sont réalisables, à condition de prévoir un vitrage et un ombrage appropriés.
- Pour l'orientation Nord, le rapport fenêtre/mur optimal pour le scénario 'sans protection solaire' s'est avéré être de 30 %.
- L'ajout d'un vitrage spécial a augmenté le rapport fenêtre/mur et la performance de la lumière du jour assurée dans la salle de classe.
- Les meilleurs types de vitrages sont ceux qui se traduisent par un maximum UDI_(300-3000lux) et un minimum d'énergie utilisée EUI ; ils correspondent aux doubles et triples vitrages à faible émissivité, avec un rapport fenêtre/mur de 60 %.
- L'orientation Sud nécessite des rapports fenêtre/mur plus réduits par rapport aux autres orientations car l'intensité de la lumière du jour est plus élevée.
- Pour une orientation Sud, la meilleure solution est un vitrage clair avec une protection solaire, en utilisant un rapport fenêtre/mur de 40 %.
- Les surfaces vitrées pourraient être encore plus importantes pour les orientations Est et Ouest (rapport fenêtre/mur 50-60 %), selon le dispositif d'ombrage et le type de vitrage utilisé.
- L'ajout de vitrages spéciaux augmente les performances énergétiques, mais réduit les performances de lumière du jour.
- Les orientations Est et Ouest sont plus difficiles à contrôler, et conduisent généralement à une consommation d'énergie plus élevée.
- L'ajout d'un dispositif d'ombrage réduit l'EUI et augmente l'UDI, permettant un rapport fenêtre/mur de 50 % dans les orientations Est et Ouest.
- Pour le cas des fenêtres sans protection solaire, un bon ajustement est obtenu grâce à l'utilisation de vitrages spéciaux, tels que le double vitrage à faible émissivité, pour un rapport fenêtre/mur allant jusqu'à 60%.

Limites de la recherche

Cette étude donne des indications utiles de ce qui peut être réalisé pour différentes orientations dans les salles de classe des établissements scolaires en climat chaud et sec, suggérant qu'il peut être possible de mettre en œuvre avec succès des surfaces vitrées plus grandes (30-60%) et ainsi permettre aux occupants du bâtiment de profiter des bienfaits de la lumière du jour.

Cependant, les solutions potentielles devront être adaptées en fonction de l'utilisation du bâtiment et elles exigent de prendre en compte de nombreux autres facteurs tels que la forme des fenêtres, le traitement des façades, la composition des murs, l'ombrage de l'environnement,

la forme de l'espace, etc. De plus, l'emplacement de la pièce dans le bâtiment affectera la surface optimale de la fenêtre, c'est-à-dire une salle de classe située au rez-de-chaussée n'a pas les mêmes conditions internes qu'une salle de classe située au dernier étage. Un exercice d'optimisation et une analyse des performances appropriés seraient nécessaires pour ces différents cas.

D'autre part, il existe certaines limitations dues à l'utilisation de l'UDI comme mesure d'optimisation de l'éclairage naturel, c'est-à-dire que la maximisation de l'UDI dans un espace peut entraîner l'apparition excessive de conditions inconfortables près des fenêtres. En outre, le manque d'instruments de mesures lumineux et thermique qui auraient permis d'enregistrer les valeurs dans tous les points du plan de travail au même temps et à plusieurs moments de la journée comme il est recommandé dans la littérature, peut avoir influencé les résultats de l'étude expérimentale.

Perspectives de la recherche

- La méthodologie décrite peut être exploitée pour établir des directives de conception de fenêtres dans les salles de classe en climat chaud et sec.
- Des travaux supplémentaires sur l'affinement des plages du confort et des réglages des paramètres de l'enveloppe du bâtiment utilisés dans l'optimisation, pourraient être entrepris.
- Des études plus approfondies sur l'ombrage et la spécification des murs seraient également bénéfiques, en particulier en ce qui concerne l'évaluation de leur impact sur la sélection des solutions les plus adaptées et les problèmes pratiques de mise en œuvre.
- Il serait intéressant que de futures études ajoutent des métriques supplémentaires au processus d'optimisation, comme l'inclusion de l'indicateur d'éblouissement DGP (Daylight Glare Probability) ou DGI (Daylight Glare Index) pour bien estimer le confort visuel dans la salle de classe ainsi que de minimiser la plage de UDI.

Bibliographie

Bibliographie

- Abdou, O. A. (1997). Effects of luminous environment on worker productivity in building spaces. *Journal of architectural engineering*, 3(3), 124-132.
- Al-Masrani, S. M., Al-Obaidi, K. M., Zalin, N. A., & Isma, M. A. (2018). Design optimisation of solar shading systems for tropical office buildings: Challenges and future trends. *Solar Energy*, 170, 849-872.
- Al-Tamimi, N., Fadzil, S. F. S., & Harun, W. M. W. (2011). The effects of orientation, ventilation, and varied WWR on the thermal performance of residential rooms in the tropics. *Journal of Sustainable development*, 4(2), 142.
- Al-Tamimi, N., & Syed Fadzil, S. (2009). *The effect of glazed fenestration area and natural ventilation on thermal performance in residential buildings in tropical region*. Paper presented at the CIBW 107 International Symposium on Construction in Developing Economies, Malaysia.
- Alam, M. J., & Islam, M. A. (2017). Effect of external shading and window glazing on energy consumption of buildings in Bangladesh. *Advances in Building Energy Research*, 11(2), 180-192.
- Albatayneh, A., Alterman, D., Page, A., & Moghtaderi, B. (2019). Development of a new metric to characterise the buildings thermal performance in a temperate climate. *Energy for Sustainable Development*, 51, 1-12.
- Alghoul, S. K., Rijabo, H. G., & Mashena, M. E. (2017). Energy consumption in buildings: A correlation for the influence of window to wall ratio and window orientation in Tripoli, Libya. *Journal of building Engineering*, 11, 82-86.
- Alhagla, K., Mansour, A., & Elbassuoni, R. (2019). Optimizing windows for enhancing daylighting performance and energy saving. *Alexandria Engineering Journal*, 58(1), 283-290.
- Alibaba, H. (2016). Determination of optimum window to external wall ratio for offices in a hot and humid climate. *Sustainability*, 8(2), 187.
- Allab, Y. (2017). *Evaluation expérimentale des performances des systèmes de ventilation dans le bâtiment: efficacité de ventilation et confort thermique*. Paris, ENSAM.
- Amaral, A. R., Rodrigues, E., Gaspar, A. R., & Gomes, Á. (2016). A thermal performance parametric study of window type, orientation, size and shadowing effect. *Sustainable Cities and Society*, 26, 456-465.
- ASHRAE 55, A. (2010). ANSI/ASHRAE 55–2010 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineering: Atlanta, GA, USA*.
- ASHRAE. (2010). ANSI/ASHRAE 55–2010 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineering: Atlanta, GA, USA*.
- ASHRAE, S. (2017). Thermal environmental conditions for human occupancy. ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. *American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers*, 145.
- Auliciems, A., & Szokolay, S. V. (1997). *Thermal comfort*.
- Aydın, D., & Mihlayanlar, E. (2020). A case study on the impact of building envelope on energy efficiency in high-rise residential buildings. Aydın, D., Mihlayanlar, E. (2020). "A case study on the impact of building envelope on energy efficiency in high-rise residential buildings", *Architecture, Civil Engineering, Environment (ACEE Journal)*, 13(1), 5-18.
- Azzouzi, S. A. (2019). *Técnicas de detección de cambios mediante teledetección para el desarrollo sostenible y la desertificación*. Universitat Politècnica de València.
- Bakens, W., Foliente, G., & Jasuja, M. (2005). Engaging stakeholders in performance-based building: lessons from the Performance-Based Building (PeBBu) Network. *Building Research & Information*, 33(2), 149-158.
- Baker, & Steemers. (2002). *Daylight Design of Buildings*, ISBN 1 873936885: London, UK, James & James.
- Bakmohammadi, P., & Noorzai, E. (2020). Optimization of the design of the primary school classrooms in terms of energy and daylight performance considering occupants' thermal and visual comfort. *Energy Reports*, 6, 1590-1607.

- Barbhuiya, S., & Barbhuiya, S. (2013). Thermal comfort and energy consumption in a UK educational building. *Building and Environment*, 68, 1-11.
- Batier. (2016). *Confort thermique et Energie dans l'habitat social en milieu méditerranéen*. Université de Montpellier.
- Batier, C. (2016). *Confort thermique et Energie dans l'habitat social en milieu méditerranéen*: Diss. Université de Montpellier.
- Belkhouane, H., Hensen, J., & Attia, S. (2017). *Thermal comfort models for net zero energy buildings in hot climates*. Paper presented at the Second International Conference on Energy and Indoor Environment for Hot Climates.
- Ben Cheikh, A. (2007). *Impact de la conception des salles de class sur l'ensoleillement, le confort visuel et le comportement des ecoliers*. Biskra, Université Mohamed Khider. Faculté des Sciences et des Sciences de l ...
- Bendekkiche, S. (2017). *Optimisation de l'éclairage naturel dans les salles de classe par simulation inverse*. Université Mohamed Khider-Biskra.
- Benharkat, S. (2006). *Impact de l'éclairage naturel zenithal sur le confort visuel dans les salles de classe. Cas d'étude*. Mémoire de magister, Université de Constantine.
- Benhouhou, M. (2012). L'impact des matériaux sur le confort thermique dans les zones semi-arides. *Memory of magister, EPAU, Algeria*.
- Benradouane, N., & Benyoucef, B. (2008). *La fenêtre et son rôle dans la conception des maisons bioclimatiques*.
- Berger, C. (2004). L'ARCHITECTURE SCOLAIRE. *Bulletin CIIP no.*
- Berghout, B. (2012). *Effet de l'implantation d'un bâtiment collectif sur le confort hygrothermique intérieur cas de Biskra, Algérie*. École de technologie supérieure.
- Berkouk, D. (2017). *Évaluation du confort thermique et lumineux dans le logement collectif: Étude comparative entre le social et le promotionnel, dans la ville de Biskra*. Université Mohamed Khider-Biskra.
- Bernier, M. (2006). Simulation de maisons «zéro-net». *Journée thématique SFT-IBPSA. Chambéry*.
- Beynon, J. (1998). *Installations et bâtiments éducatifs: ce que les planificateurs doivent savoir*: UNESCO, Institut international de planification de l'éducation.
- Bodart, M. (2008). *Guide précis d'aide à la construction des modèles réduits.*, Université Catholique de Louvain.
- Bojić, M., & Yik, F. (2007). Application of advanced glazing to high-rise residential buildings in Hong Kong. *Building and Environment*, 42(2), 820-828.
- Boubekri, M. (2007). *L'éclairage naturel*. . In M. Duked, *École et jardins d'enfants* (p. 255). Berlin: Infolio éditions.
- Bouchahm, G., & Bourebia, F. (2010). L'impact de l'orientation des parois transparentes sur le confort thermique dans une salle de classe à Constantine. *Sciences & Technologie. D, Sciences de la terre*, 71-80.
- Boyce, P. R. (2003). Human factors in lighting.
- Brandi, U. (2006). *Lighting Design: Principles, Implementation, Case Studies (Detail Practice)*: Birkhäuser Edition Detail, Berlin.
- Brown, G., & Dekay, M. (2000). *Sun. Wind and Light: Architectural Design Strategies* John Wiley & Sons.
- Cadiergues, R. (2012). L'éclairage artificiel. *Guide RefCad nR27. a.*
- Cantin, R., Moujalled, B., Guarracino, G., & Audin, R. M. (2005). Complexité du confort thermique dans les bâtiments. *VIème congrès Européen de Science des Systèmes*, 02-04.
- Carlucci, S. (2013). Thermal comfort assessment of buildings.
- Chakali, M. (2019). *L'impact de la fenêtre sur le comportement thermique et respiratoire dans les constructions à forte inertie dans les zones chaudes et arides*. Université Mohamed Khider-Biskra.
- Châtelet, A.-M., & Le Cœur, M. (2004). L'architecture scolaire: essai d'historiographie internationale. *Histoire de l'éducation*, 102.
- Chen, Y., Liu, J., Pei, J., Cao, X., Chen, Q., & Jiang, Y. (2014). Experimental and simulation study on the performance of daylighting in an industrial building and its energy saving potential. *Energy and Buildings*, 73, 184-191.

- Clift, M. (1996). Building quality assessment (BQA) for offices. *Structural Survey*.
- da Graça, V. A. C., Kowaltowski, D. C. C. K., & Petreche, J. R. D. (2007). An evaluation method for school building design at the preliminary phase with optimisation of aspects of environmental comfort for the school system of the State São Paulo in Brazil. *Building and Environment*, 42(2), 984-999.
- Daich, S. (2011). *Simulation et optimisation du système light shelf sous des conditions climatiques spécifiques, Cas de la ville de Biskra*. Université Mohamed Khider Biskra.
- Daich, S. (2019). *Modélisation du système anidolique pour un environnement lumineux intérieur intégré*. UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.
- De Herde, A., & Liébard, A. (2005). *Traité d'architecture et d'urbanisme bioclimatiques: concevoir, édifier et aménager avec le développement durable*.
- de Wilde, P. (2019). Ten questions concerning building performance analysis. *Building and Environment*, 153, 110-117.
- Delaune, M. (2003). *William Henssler (1875-1951)*. University of Geneva.
- Deleval, E. (2016). *Architecture scolaire et pédagogie*. Partie d'une mémoire de magistère, Université Catholique de Louvain, Saint-Luc, Tournai. Retrieved from https://issuu.com/elinedelevel/docs/m__moire/144
- Delgarm, N., Sajadi, B., & Delgarm, S. (2016). Multi-objective optimization of building energy performance and indoor thermal comfort: A new method using artificial bee colony (ABC). *Energy and Buildings*, 131, 42-53.
- Déoux, S. (2019). Impacts sanitaires des conditions climatiques des établissements scolaires sur le littoral de l'Île de la Réunion. *Envirobat Réunion – PACTE*.
- Disch, R. (2008). Das Plusenergiehaus. *Site internet*. URL: <http://www.plusenergiehaus.de>.
- El Deeb, K. (2013). *Combined Effect Of Window-To-Wall Ratio And Wall Composition On Energy Consumption*. Paper presented at the PLEA.
- Elghamry, R., & Hassan, H. (2020). Impact of window parameters on the building envelope on the thermal comfort, energy consumption and cost and environment. *International Journal of Ventilation*, 19(4), 233-259.
- EN12464-1. (2002). Lighting—Lighting of Work Places—Part 1: Indoor Work Places. *European Committee for Standardization, Brussels, Belgium*.
- EN.2464-2. Light and lighting—Lighting of work places—Part. *CEN*, , 2.
- Fadzil, S. F. S., & Sia, S.-J. (2004). Sunlight control and daylight distribution analysis: the KOMTAR case study. *Building and Environment*, 39(6), 713-717.
- Fang, Y. (2017). *Optimization of Daylighting and Energy Performance Using Parametric Design, Simulation Modeling, and Genetic Algorithms*. North Carolina State University.
- Fanger, P. O. (1970). Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering. *Thermal comfort. Analysis and applications in environmental engineering*.
- Farley, K. M., & Veitch, J. A. (2001). *A room with a view: A review of the effects of windows on work and well-being*: Institute for Research in Construction, National Research Council Canada.
- Feddema, J. J. (2005). A revised Thornthwaite-type global climate classification. *Physical Geography*, 26(6), 442-466.
- Ferrandez, J. (2017). Exposition l'école en Algérie de 1830 à nos jours. *Musée nationale de l'éducation-Rouen*.
- Fontaine, A., & Brühwiler, I. (2017). La diffusion de l'enseignement mutuel girardien en Suisse: des déclinaisons pédagogiques transcantoniales pour forger un «écolier-citoyen» moralisé? *Traverse: Revue d'histoire*, 1, 32-41.
- Forster, S., & IRDP, C. S. (2004). Architecture scolaire: regard historique tourné vers l'avenir. *Bulletin CIIP*, 15.
- Franck, K. A., & Schneekloth, L. H. (1994). *Ordering space: types in architecture and design*: Van Nostrand Reinhold.
- Futrell, B. J., Ozelkan, E. C., & Brentrup, D. (2015). Optimizing complex building design for annual daylighting performance and evaluation of optimization algorithms. *Energy and Buildings*, 92, 234-245.

- Gasparella, A., Pernigotto, G., Cappelletti, F., Romagnoni, P., & Baggio, P. (2011). Analysis and modelling of window and glazing systems energy performance for a well insulated residential building. *Energy and Buildings*, 43(4), 1030-1037.
- Gibson, E. (1982). A Report from CIB Commission W60 Working with the Performance Approach to Building. *Performance Concept in Building*, 23-30.
- Givoni, B. (1978). L'homme, l'architecture et le climat..(Trad. de l'angl.).
- Goia, F. (2016). Search for the optimal window-to-wall ratio in office buildings in different European climates and the implications on total energy saving potential. *Solar Energy*, 132, 467-492.
- Goia, F., Haase, M., & Perino, M. (2013). Optimizing the configuration of a façade module for office buildings by means of integrated thermal and lighting simulations in a total energy perspective. *Applied energy*, 108, 515-527.
- Grynning, S., Time, B., & Matusiak, B. (2014). Solar shading control strategies in cold climates—Heating, cooling demand and daylight availability in office spaces. *Solar Energy*, 107, 182-194.
- Gut, P., & Ackerknecht, D. (1993). *Climate responsive buildings: appropriate building construction in tropical and subtropical regions*.
- Guttman, C. (2003). *Education in and for the Information Society*: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.
- Hartkopf, V. H., Loftness, V. E., & Mill, P. A. (1986). The concept of total building performance and building diagnostics *Building performance: Function, preservation, and rehabilitation*: ASTM International.
- Harwood, E. (2015). *England's schools: history, architecture and adaptation*: Historic England.
- Hassouneh, K., Alshboul, A., & Al-Salaymeh, A. (2010). Influence of windows on the energy balance of apartment buildings in Amman. *Energy Conversion and Management*, 51(8), 1583-1591.
- Hee, W., Alghoul, M., Bakhtyar, B., Elayeb, O., Shameri, M., Alrubaih, M., & Sopian, K. (2015). The role of window glazing on daylighting and energy saving in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 323-343.
- Heschong, L., Wymelenberg, K. V. D., Ashmore, M. A. J., Beltran, L., Bos, J., Brentrup, D., . . . Glaser, D. (2012). *Approved Method: IES Spatial Daylight Autonomy (sDA) and Annual Sunlight Exposure (ASE)*: Illuminating Engineering Society of North America.
- Holm, D., & Engelbrecht, F. (2005). Practical choice of thermal comfort scale and range in naturally ventilated buildings in South Africa. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering= Joernaal van die Suid-Afrikaanse Instituut van Siviele Ingenieurswese*, 47(2), 9-14.
- Hoyt, S., & Cbe, T. (2017). thermal comfort tool. Center for the Built Environment.
- Huizenga, C., Zhang, H., Mattelaer, P., Yu, T., Arens, E. A., & Lyons, P. (2006). Window performance for human thermal comfort.
- IESNA, I. (2000). Lighting handbook. *Illuminating Engineering Society of North America, New York, USA*.
- Iturra, E. E. M. (2011). *Impact de la configuration des bâtiments scolaires sur leur performance lumineuse, thermique et énergétique*. Université Laval.
- Ivanova, E. (2019). School Building Planning. Main Types Of Systems (Plans) Of School Buildings. *World Science*, 1(7 (47)), 18-31.
- Jacquier, F., Antipas, M., & Veuillet, C. (2012). La fenêtre, un patrimoine en danger. *le canton de Vaud, SIPAL, Section monuments et sites*
- Jedidi, M., & Benjeddou, O. (2016). *La thermique du bâtiment: Du confort thermique au choix des équipements de chauffage et de clim*: Dunod.
- Jiun, N. (2005). *Development of total building performance (TBP) assessment system for office buildings*. Doctoral thesis, 2004: National university of Singapore.
- Kaba, I. (2012). *Enseignement de la lumière naturelle en architecture (Cas du système LMD)*. Université Mohamed Khider-Biskra.
- Kaplan, S. (1995). The restorative benefits of nature: Toward an integrative framework. *Journal of environmental psychology*, 15(3), 169-182.
- Khoroshiltseva, M., Slanzi, D., & Poli, I. (2016). A Pareto-based multi-objective optimization algorithm to design energy-efficient shading devices. *Applied energy*, 184, 1400-1410.

- Kim, S., Zadeh, P. A., Staub-French, S., Froese, T., & Cavka, B. T. (2016). Assessment of the impact of window size, position and orientation on building energy load using BIM. *Procedia Engineering*, 145, 1424-1431.
- Kim, S. H., Kim, S. S., Kim, K. W., & Cho, Y. H. (2014). A study on the proposes of energy analysis indicator by the window elements of office buildings in Korea. *Energy and Buildings*, 73, 153-165.
- Kirimtat, A., Krejcar, O., Ekici, B., & Tasgetiren, M. F. (2019). Multi-objective energy and daylight optimization of amorphous shading devices in buildings. *Solar Energy*, 185, 100-111.
- Konis, K., Gamas, A., Kensek, K., & Hall, W. (2016). Passive Performance and Building Form: An Optimization Framework for Early-Stage Design Support Author names and affiliation.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated.
- Küller, R., & Lindsten, C. (1992). Health and behavior of children in classrooms with and without windows. *Journal of environmental psychology*, 12(4), 305-317.
- Kwok, A. G. (1997). *Thermal comfort in naturally ventilated and air-conditioned classrooms in the tropics*: University of California, Berkeley.
- Labib, R., & Mayhoub, M. (2015). *Towards A Solution for the Inevitable Use of the Glazed Façades in the Arid Regions via the Parametric Design Approach*.
- Labreche, S. (2014). *Forme architecturale et confort hygrothermique dans les bâtiments éducatifs, cas des infrastructures d'enseignement supérieur en régions arides*. Faculté des sciences et de la technologie UMKBiskra.
- Lai, K., Wang, W., & Giles, H. (2017). Solar shading performance of window with constant and dynamic shading function in different climate zones. *Solar Energy*, 147, 113-125.
- Lee, J.-W., Jung, H.-J., Park, J.-Y., Lee, J., & Yoon, Y. (2013). Optimization of building window system in Asian regions by analyzing solar heat gain and daylighting elements. *Renewable energy*, 50, 522-531.
- Leech, G. (2013). Classification of Arid & Semi-Arid Areas: A Case Study in Western Australia. *ANU Undergraduate Research*, 5(1), 79-99.
- Liberman, J. (1990). *Light: medicine of the future: how we can use it to heal ourselves now*: Inner Traditions/Bear & Co.
- Liu, S., Kwok, Y. T., Lau, K. K.-L., Chan, P. W., & Ng, E. (2019). Investigating the energy saving potential of applying shading panels on opaque façades: A case study for residential buildings in Hong Kong. *Energy and Buildings*, 193, 78-91.
- Ma, P., Wang, L.-S., & Guo, N. (2015). Maximum window-to-wall ratio of a thermally autonomous building as a function of envelope U-value and ambient temperature amplitude. *Applied energy*, 146, 84-91.
- Machairas, V., Tsangrassoulis, A., & Axarli, K. (2013). Algorithms for optimization of building design. *Renewable & Sustainable Energy Reviews(IKKEART-2014-804)*.
- Mackey, C. C. W. (2015). *Pan climatic humans: shaping thermal habits in an unconditioned society*. Massachusetts Institute of Technology.
- Malika, M. (2010). *Évaluation des performances énergétiques d'une fenêtre dotée d'un vitrage électrochromique*. École de technologie supérieure.
- Mangkuto, R. A., Rohmah, M., & Asri, A. D. (2016). Design optimisation for window size, orientation, and wall reflectance with regard to various daylight metrics and lighting energy demand: A case study of buildings in the tropics. *Applied energy*, 164, 211-219.
- Manzan, M. (2014). Genetic optimization of external fixed shading devices. *Energy and Buildings*, 72, 431-440.
- Mardaljevic, J. (2015). Climate-based daylight modelling and its discontents.
- Maugard, A., Millet, J.-R., & Quenard, D. (2005). Vers des bâtiments à énergie positive. *Présentation du CSTB*.
- McIntyre, D., & Griffiths, I. (1975). Subjective responses to atmospheric humidity. *Environmental research*, 9(1), 66-75.
- McNeil, A., & Lee, E. S. (2013). A validation of the Radiance three-phase simulation method for modelling annual daylight performance of optically complex fenestration systems. *Journal of Building Performance Simulation*, 6(1), 24-37.

- Mercier, S. J. C. (2009). La température agréable: manipulation des fenêtres et dynamique du confort environnemental dans une salle de classe climatisée naturellement.
- Merghani, A. H., & Bahloul, S. A. (2016). Comparison between Radiance Daylight Simulation Software Results and Measured on-Site Data. *Journal of Building and Road Research*, 20.
- Mokhtari, A., Brahim, K., & Benziada, R. (2008). Architecture et confort thermique dans les zones arides Application au cas de la ville de Béchar. *Journal of Renewable Energies*, 11(2), 307–315.
- Moujalled. (2007). Modélisation dynamique du confort thermique dans les bâtiments naturellement ventilés. *Institut National des Sciences Appliquées, Lyon, France*.
- Mousavi, S. M., Khan, T. H., & Lim, Y.-W. (2016). Empirical validation of Radiance-IES daylight simulation for furnished and unfurnished rooms under a tropical sky. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 7(1), 61-69.
- Muhaisen, A. S., & Daboor, H. R. (2013). Studying the impact of orientation, size, and glass material of windows on heating and cooling energy demand of the Gaza strip buildings. *J. Archit. Plan*, 27.
- Murdi, L. (2002). De l'hygiène au bien-être, du développement sans frein au développement durable: ambiances lumineuses. *Paris: Ecole d'architecture de Paris-Belleville*, 1-4.
- Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2005). Useful daylight illuminance: a new paradigm for assessing daylight in buildings. *Lighting Research & Technology*, 37(1), 41-57.
- Nabil, A., & Mardaljevic, J. (2006). Useful daylight illuminances: A replacement for daylight factors. *Energy and Buildings*, 38(7), 905-913.
- Narboni, R. (2006). Lumière et ambiances. *Concevoir des éclairages pour l'architecture et la ville, Paris: Editions le Moniteur*.
- Neufert. (1996). Les éléments des projets de construction e7. Paris: Dunod.
- Ng, E. Y.-Y., Poh, L. K., Wei, W., & Nagakura, T. (2001). Advanced lighting simulation in architectural design in the tropics. *Automation in Construction*, 10(3), 365-379.
- Nicklas, M. H., & Bailey, G. B. (1996). Analysis of the Performance of Students in Daylit Schools.
- Ochoa, C. E., Aries, M. B., van Loenen, E. J., & Hensen, J. L. (2012). Considerations on design optimization criteria for windows providing low energy consumption and high visual comfort. *Applied energy*, 95, 238-245.
- Omar, O. M. E.-s. (2008). *Advanced daylight technologies for sustainable architectural design*. Department of Architecture Faculty of Engineering, Alexandria University.
- Ouf, M. M., & Issa, M. H. (2017). Energy consumption analysis of school buildings in Manitoba, Canada. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 6(2), 359-371.
- Palmero-Marrero, A. I., & Oliveira, A. C. (2010). Research on heating and cooling requirements of buildings with solar louvre devices. *Advances in Building Energy Research*, 4(1), 1-21.
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11(5), 1633-1644.
- Pereira, L. D., Raimondo, D., Corgnati, S. P., & Da Silva, M. G. (2014). Energy consumption in schools— A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 40, 911-922.
- Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394-398.
- Phillips, D. (2004). *Daylighting: natural light in architecture*: Routledge.
- Phillips, R., Troup, L., Fannon, D., & Eckelman, M. J. (2020). Triple bottom line sustainability assessment of window-to-wall ratio in US office buildings. *Building and Environment*, 182, 107057.
- Piderit Moreno, M. B. (2011). *Daylighting design strategies for visual comfort in classrooms*. UCL- Université Catholique de Louvain.
- Puteh, M., Ibrahim, M. H., Adnan, M., Che' Ahmad, C. N., & Noh, N. M. (2012). Thermal comfort in classroom: constraints and issues. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 46, 1834-1838.
- Qingsong, M., & Fukuda, H. (2016). Parametric office building for daylight and energy analysis in the early design stages. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 216, 818-828.
- Raji, B., Tenpierik, M. J., & Van den Dobbelsteen, A. (2017). Early-stage design considerations for the energy-efficiency of high-rise office buildings. *Sustainability*, 9(4), 623.

- Rashid, M., Malik, A., & Ahmad, T. (2016). Effect of window wall ratio (WWR) on heat gain in commercial buildings in the climate of Lahore. *International Journal of Research in Chemical, Metallurgical and Civil Engineering*, 3(1), 122-125.
- Reinhart, C., & Breton, P.-F. (2009). Experimental validation of Autodesk® 3ds Max® Design 2009 and DAYSIM 3.0. *Leukos*, 6(1), 7-35.
- Reinhart, C., & Walkenhorst, O. (2001). Dynamic RADIANCE-based Daylight Simulations for a full-scale Test Office with outer Venetian Blinds. *Energy & Buildings*, 33(7), 683-697.
- Reinhart, C. F., & Andersen, M. (2006). Development and validation of a Radiance model for a translucent panel. *Energy and Buildings*, 38(7), 890-904.
- Reinhart, C. F., Mardaljevic, J., & Rogers, Z. (2006). Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design. *Leukos*, 3(1), 7-31.
- Reiter, S., & De Herde, A. (2004). *L'éclairage naturel des bâtiments*: Presses univ. de Louvain.
- Rigolon, A. (2010). European design types for 21st century schools: an overview.
- Robillart, M. (2015). *Etude de stratégies de gestion en temps réel pour des bâtiments énergétiquement performants*. Paris, ENMP.
- Roudsari, M. S., Pak, M., & Smith, A. (2013). *Ladybug: a parametric environmental plugin for grasshopper to help designers create an environmentally-conscious design*. Paper presented at the Proceedings of the 13th international IBPSA conference held in Lyon, France Aug.
- Roulet, C.-A. (1987). *Energétique du bâtiment: Prestations du bâtiment, bilan énergétique global*: Presses polytechniques romandes.
- Ruck, N., Aschehoug, Ø., & Aydinli, S. (2000). Daylight buildings. A source book on daylighting systems and components.
- Rudbeck, C. (2002). Service life of building envelope components: making it operational in economical assessment. *Construction and Building Materials*, 16(2), 83-89.
- Rupp, R. F., Vásquez, N. G., & Lamberts, R. (2015). A review of human thermal comfort in the built environment. *Energy and Buildings*, 105, 178-205.
- Saddok, A. (2015). *Etude du confort thermique des salles de cours des établissements scolaires à différentes typologie: cas des établissements d'enseignements moyens et secondaires à Tizi-Ouzou*.
- Sadeg, M. (2014). Évolution du système éducatif de l'Algérie de 1830 à 2012 : Origines historiques des disparités régionales. *Revue des sciences commerciales et de gestion*, 10(1), 15-59.
- Sadick, A.-M., & Issa, M. H. (2018). Assessing physical conditions of indoor space enclosing elements in schools in relation to their indoor environmental quality. *Journal of building Engineering*, 20, 520-530.
- Sadineni, S. B., Madala, S., & Boehm, R. F. (2011). Passive building energy savings: A review of building envelope components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(8), 3617-3631.
- Samani, P., Leal, V., Mendes, A., & Correia, N. (2016). Comparison of passive cooling techniques in improving thermal comfort of occupants of a pre-fabricated building. *Energy and Buildings*, 120, 30-44.
- Saussay, A., Rivera, G. L., Malliet, P., & Reynès, F. (2016). Changer de Mix: urgence et opportunité de la transition énergétique en France. *OFCE Policy Brief. OFCE, Sciences Po*, 8, 10.
- Scartezzini, J. L. e. a. (1994). Office Lighting. Publication of RAVEL Swiss action programme. *EDMZ, Bern, Switzerland*.
- Semahi, S., Zemmouri, N., Singh, M. K., & Attia, S. (2019). Comparative bioclimatic approach for comfort and passive heating and cooling strategies in Algeria. *Building and Environment*, 161, 106271.
- Seoud, S. (2012). *Audit énergétique de bâtiment tertiaire cas de trois bâtiments existants à Alger*. Ecole Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme-Hocine Aït Ahmed.
- Serra Florensa, R., & Coch Roura, H. (2004). *Arquitectura y energía natural* (Vol. 17): Universitat Politècnica de Catalunya. Iniciativa Digital Politècnica.
- Sghiouri, H., Mezrhab, A., Karkri, M., & Naji, H. (2018). Shading devices optimization to enhance thermal comfort and energy performance of a residential building in Morocco. *Journal of building Engineering*, 18, 292-302.

- Singh, Ooka, R., & Rijal, H. (2018). *Thermal comfort in Classrooms: A critical review*. Paper presented at the Proceedings of the 10th Windsor Conference—Rethinking Comfort, Windsor, UK.
- Singh, M., & Garg, S. (2009). Energy rating of different glazings for Indian climates. *Energy*, 34(11), 1986-1992.
- Smiley, F. (1996). Students delight in daylight. *International Association for Energy Efficient Lighting Newsletter*, 5(2), 11-12.
- Soleimani, K., Abdollahzadeh, N., & Zomorodian, Z. S. (2021). Improving Daylight Availability in Heritage Buildings: A Case Study of Below-grade Classrooms in Tehran. *Journal of Daylighting*, 8(1), 120-133.
- Su, X., & Zhang, X. (2010). Environmental performance optimization of window–wall ratio for different window type in hot summer and cold winter zone in China based on life cycle assessment. *Energy and Buildings*, 42(2), 198-202.
- Sun, X., Gou, Z., & Lau, S. S.-Y. (2018). Cost-effectiveness of active and passive design strategies for existing building retrofits in tropical climate: Case study of a zero energy building. *Journal of Cleaner Production*, 183, 35-45.
- Tabadkani, A., Banihashemi, S., & Hosseini, M. R. (2018). *Daylighting and visual comfort of oriental sun responsive skins: A parametric analysis*. Paper presented at the Building simulation.
- Tebbouche, H. (2010). *L'impact de la qualité environnementale des établissements scolaires sur la performance du système éducatif en Algérie - cas des lycées de la ville de Jijel*. Mémoire de Magistère, Université de Jijel.
- Thiers, S. (2008). *Bilans énergétiques et environnementaux de bâtiments à énergie positive*. École Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Van Den Wymelenberg, K. (2012). Patterns of occupant interaction with window blinds: A literature review. *Energy and Buildings*, 51, 165-176.
- Vanhoutteghem, L., Skarning, G. C. J., Hviid, C. A., & Svendsen, S. (2015). Impact of façade window design on energy, daylighting and thermal comfort in nearly zero-energy houses. *Energy and Buildings*, 102, 149-156.
- Veitch, J. A., & Newsham, G. R. (1996). Determinants of Lighting Quality II: Research and Recommendations.
- Wargocki, P., & Wyon, D. P. (2007). The effects of moderately raised classroom temperatures and classroom ventilation rate on the performance of schoolwork by children (RP-1257). *Hvac&R Research*, 13(2), 193-220.
- Williams, B. (1993). Editorial: What Performance. *Property Management*, 11(13).
- Winterbottom, M., & Wilkins, A. (2009). Lighting and discomfort in the classroom. *Journal of environmental psychology*, 29(1), 63-75.
- Xie, X., Wei, J., & Huang, J. (2017). Shading Technology. In R. Wang & X. Zhai (Eds.), *Handbook of Energy Systems in Green Buildings* (pp. 1-37). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Yeom, S., Kim, H., Hong, T., & Lee, M. (2020). Determining the optimal window size of office buildings considering the workers' task performance and the building's energy consumption. *Building and Environment*, 177, 106872.
- Yoon, Y., Moon, J. W., & Kim, S. (2016). Development of annual daylight simulation algorithms for prediction of indoor daylight illuminance. *Energy and Buildings*, 118, 1-17.
- Zahiri, S., & Altan, H. (2016). The effect of passive design strategies on thermal performance of female secondary school buildings during warm season in a hot and dry climate. *Frontiers in built environment*, 2, 3.
- Zare, S., Hasheminezhad, N., Sarebanzadeh, K., Zolala, F., Hemmatjo, R., & Hassanvand, D. (2018). Assessing thermal comfort in tourist attractions through objective and subjective procedures based on ISO 7730 standard: A field study. *Urban climate*, 26, 1-9.
- Zeiler, W., & Boxem, G. (2009). Effects of thermal activated building systems in schools on thermal comfort in winter. *Building and Environment*, 44(11), 2308-2317.
- Zekraoui, D. (2017). *L'impact de l'ouverture de la façade sur la consommation de l'énergie dans les bâtiments à usage de bureau sous un climat chaud et sec*. Université Mohamed Khider-Biskra.
- Zhai, Y., Wang, Y., Huang, Y., & Meng, X. (2019). A multi-objective optimization methodology for window design considering energy consumption, thermal environment and visual performance. *Renewable energy*, 134, 1190-1199.

- Zhang, A., Bokel, R., van den Dobbelsteen, A., Sun, Y., Huang, Q., & Zhang, Q. (2017). Optimization of thermal and daylight performance of school buildings based on a multi-objective genetic algorithm in the cold climate of China. *Energy and Buildings*, 139, 371-384.
- Zhang, J., Liu, N., & Wang, S. (2020). *A parametric approach for performance optimization of residential building design in Beijing*. Paper presented at the Building Simulation.
- Zhao, J., & Du, Y. (2020). Multi-objective optimization design for windows and shading configuration considering energy consumption and thermal comfort: A case study for office building in different climatic regions of China. *Solar Energy*, 206, 997-1017.
- Zomorodian, Z. S., & Nasrollahi, F. (2013). Architectural design optimization of school buildings for reduction of energy demand in hot and dry climates of Iran. *International Journal of Architectural Engineering & Urban Planning*, 23(1), 41-50.
- Zomorodian, Z. S., Tahsildoost, M., & Hafezi, M. (2016). Thermal comfort in educational buildings: A review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 895-906.

Annexes

Annexe A

Annexe A : Conditions climatiques de la ville de Biskra

Le logiciel « Grasshopper » a été utilisé pour illustrer les graphes des données météorologiques de la ville de Biskra en utilisant un fichier climatique format « epw » sur 15 ans (2003-2017).

La figure A.1 illustre les valeurs du rayonnement solaire horaire annuel de la ville de Biskra créé par le logiciel "Grasshopper". Il apparaît que Biskra bénéficie au cours de l'année d'un rayonnement solaire intense de 500 Wh/m² en Hiver qui atteint jusqu'à 1000 Wh/m² sur le plan horizontal.

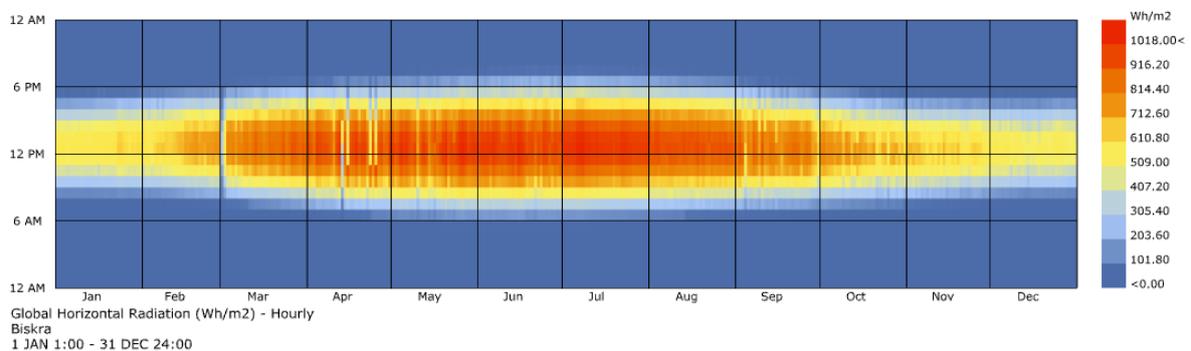


Figure A.1 : Rayonnement solaire horaire annuel de la ville de Biskra (Source : auteur, 2019)

La ville de Biskra se caractérise par des températures élevées causées par un rayonnement solaire intense. La figure A.2 présente les températures extérieures horaires annuelles. Pendant les trois mois de la saison froide de Décembre à Février ; les températures journalières sont douces (10 °C à 25 °C) tandis que les températures nocturnes sont froides, elles descendent à moins de 5 °C. Biskra est également caractérisée par une longue période chaude de Mai à Octobre ; la température peut dépasser plus de 40 °C en Été.

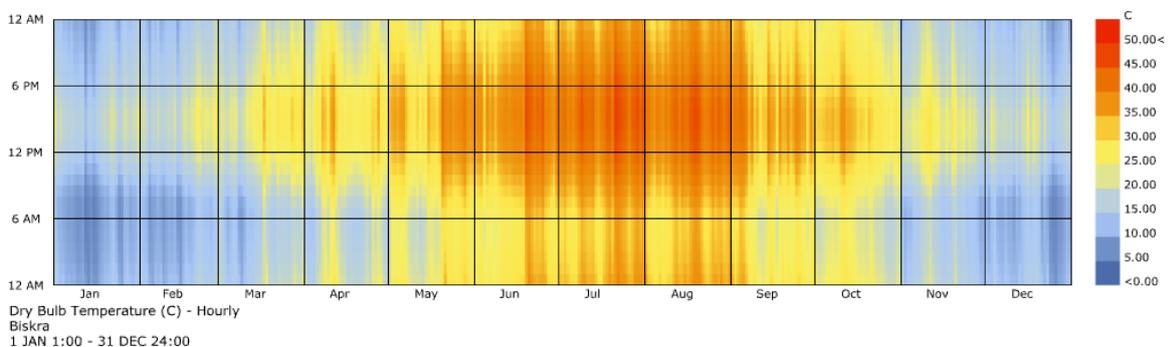


Figure A.2 : La température annuelle horaire de la ville de Biskra (Source : auteur, 2019)

D'après la figure A.3, l'humidité relative de cette région est généralement faible, pendant la journée et surtout pendant les mois d'Été, elle s'affaiblit à moins de 19%. En Hiver, elle varie entre 46% et 55% le jour et atteint 80% la nuit.

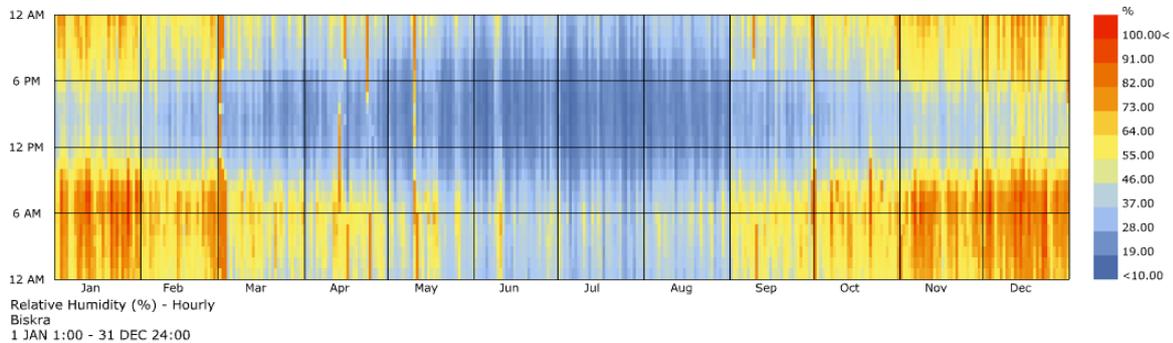


Figure A.3 : Humidité relative horaire annuelle de la ville de Biskra (Source : auteur, 2019)

Le climat de la ville de Biskra est similaire à celui des régions désertiques en raison de son emplacement au nord du Grand Sahara. Un ciel clair régnant presque toute l'année et dont la luminance dépasse 100 000 lux surtout lors de l'équinoxe d'Été (Figure A.4), et atteint le maximum à midi, un ciel sans nuage (ciel clair) est dominant.

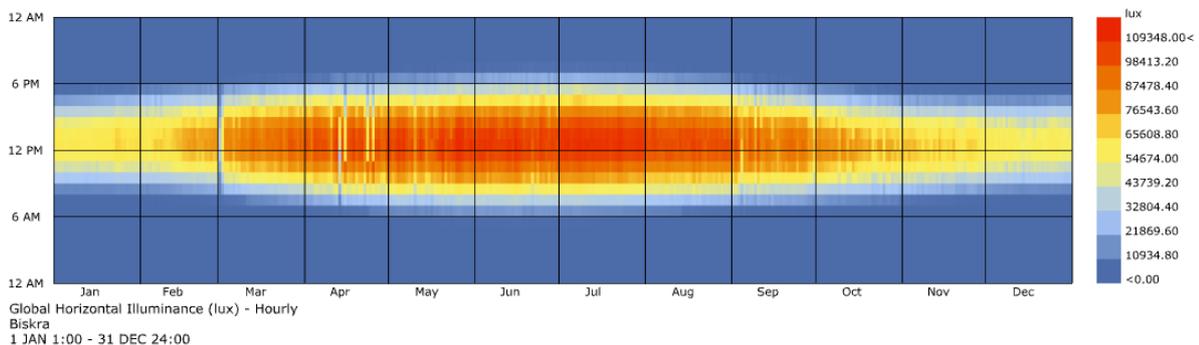


Figure A.4 : Eclairage horizontale globale horaire annuelle de la ville de Biskra (Source: auteur, 2019)

Les précipitations annuelles sont très faibles, caractérisées par la rareté et l'irrégularité. Les précipitations atteignent leur valeur maximale (20 mm) au cours du mois de Mars. Pendant la période hivernale, le nombre moyen de jours avec précipitations et de deux à trois jours avec une précipitation moyenne de 12 mm. Alors que les précipitations moyennes de la période estivale sont presque nulles, elles n'atteignent que 3 mm (Berkouk, 2017).

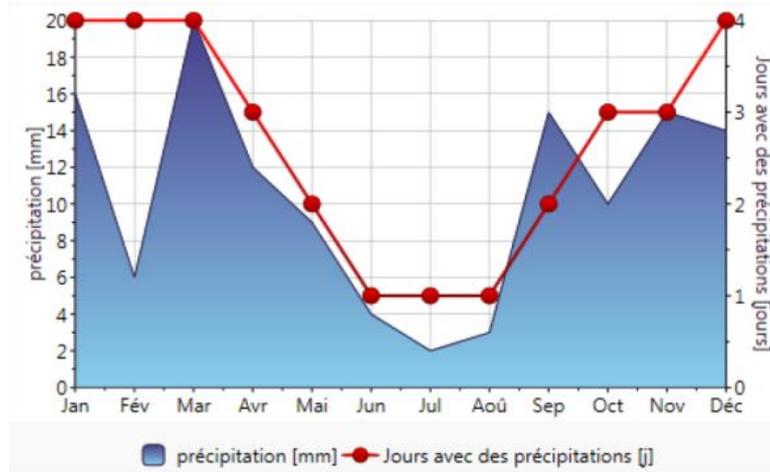


Figure A.5 :

Précipitations

mensuelle de la ville de Biskra (Source: Berkouk, 2017)

La figure A.6 illustre le régime des vents à Biskra. Les vents dominants soufflent dans deux directions ; les vents froids proviennent de la direction Nord-Ouest avec une vitesse de 17m/s. Les vents chauds sont de direction sud-est avec une vitesse de 15 m/s à une température pouvant atteindre 43°C.

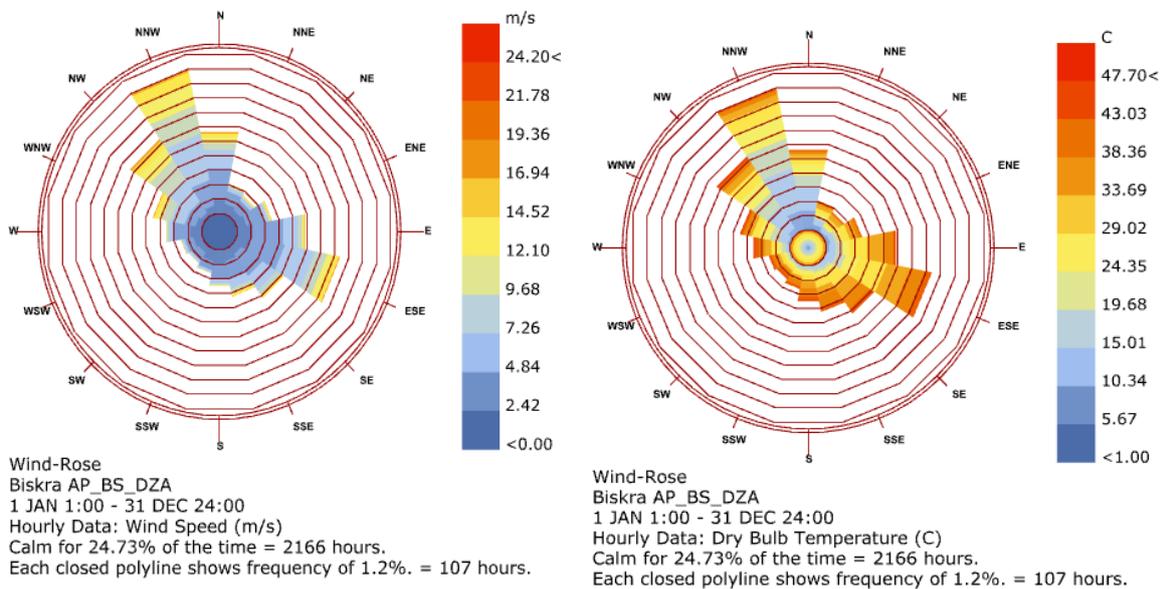
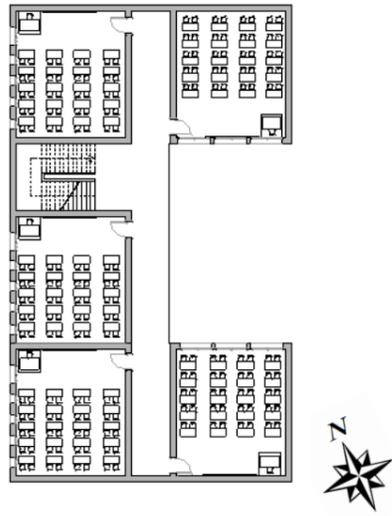


Figure A.6 : Rose des vents, (a) vitesse horaire du vent, (b) température sèche horaire du vent (Source: auteur, 2019)

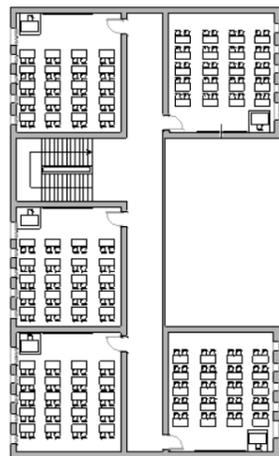
Annexe B

Tableau des valeurs des éclairagements mesurés dans les salles de classes pendant les 3 journées de prises de mesures en Hiver et en Été
Annexe C : Plans et façades des cas d'études choisis.

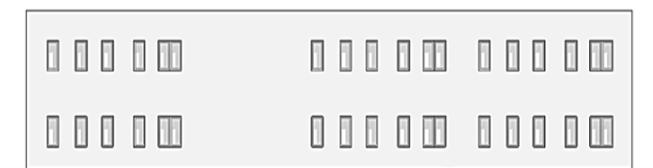
CEM GHAMRI HOUSINE



Plan R.D.C

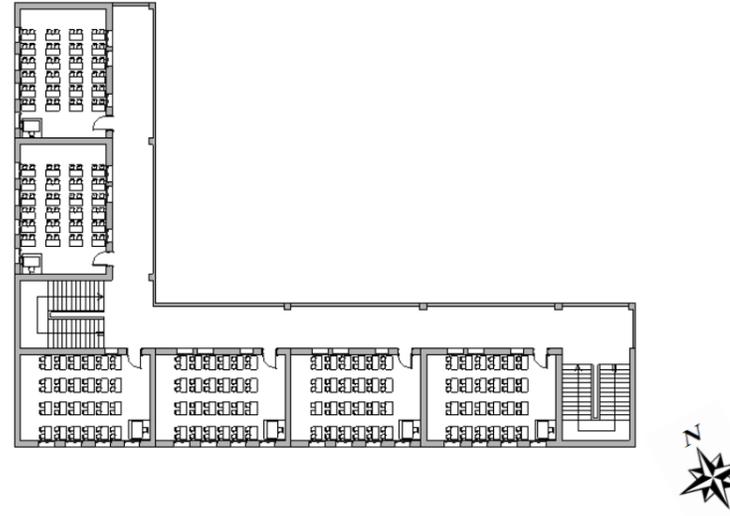


Plan 1^{er} Etage

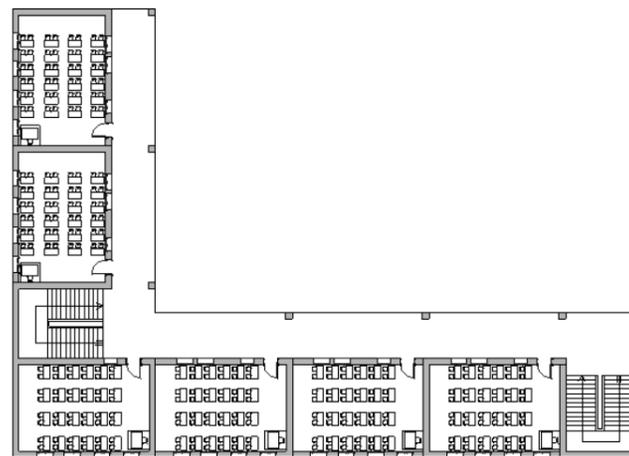


Façades Nord-

LYCEE CHIKH MOHAMED KHEIREDDINE



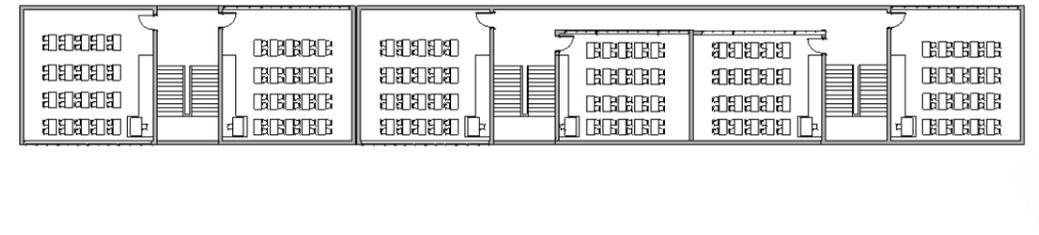
Plan R.D.C



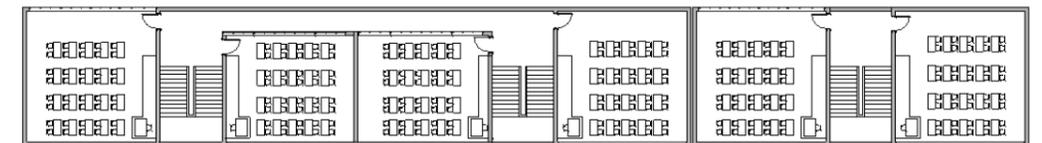
Plan 1^{er} Etage



CEM BACHIR BEN NACER



Plan 1^{er} étage



Plan 2^{ème} Etage

